

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікро- та наноелектроніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 20__ р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра**

з напрямку підготовки 6.050801 Мікро-та наноелектроніка
(код і назва)

на тему: П'єзоелектричний двигун малої потужності _____

Виконав : студент 4 курсу, групи ДП-52 (шифр групи)

Гетманчук Віктор Вікторович _____ (підпис)
(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник Надкерничний Степан Петрович, старший викладач _____ (підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Консультант з нормоконтролю проф., к.т.н., доц.. Орлов А.Т. _____

Консультант з інформаційних питань доц.. к.т.н., Діденко Ю.В. _____

Рецензент _____ (підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки
(повна назва)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) _____
(ініціали, прізвище)
«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

групи ДП- 52 Гетманчук Віктор Вікторович

(група, прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи П'єзоелектричний двигун малої потужності

керівник роботи Надкерничний Степан Петрович, старший викладач,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом роботи 04 червня 2019 р.

3. Вихідні дані роботи П'єзоелектричний обертовий двигун потужністю 1Вт з автономним живленням

4. Перелік питань, які мають бути розроблені (зміст роботи) 1.Ознайомитися з будовою та принципом роботи п'єзоелектричних двигунів. 2.Освоїти принципи конструювання п'єзоелектричного двигуна. 3.Розробка конструкції експериментального п'єзоелектричного двигуна. 4.Вибір матеріалу п'єзокераміки для двигуна. 5.Проектування та виготовлення п'єзоелектричного двигуна. 6.Дослідження частотної характеристики п'єзоелектричного двигуна. 7.Дослідження експлуатаційних характеристик та впливу температури на його роботу. 8.Розробка схеми живлення п'єзоелектричного двигуна. 9.Обговорення результатів дослідження та написання дипломної роботи.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)_
1. Види конструкцій п'єзодвигуна. 2. Модель принципу дії обертового п'єзодвигуна. 3. П'єзоелектричні матеріали та їх характеристики. 4. Конструкція п'єзодвигуна та його характеристики.

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план виконання роботи

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Ознайомитися з будовою та принципом роботи п'єзоелектричних двигунів.	28.02.19	
	Освоїти принципи конструювання п'єзоелектричного двигуна.	14.03.19	
	Розробка конструкції експериментального п'єзоелектричного двигуна та вибір матеріалу п'єзокераміки для нього.	16.04.19	
	Проектування та виготовлення п'єзоелектричного двигуна.	25.04.19	
	Дослідження частотної характеристики п'єзоелектричного двигуна, експлуатаційних характеристик та впливу температури на його роботу	16.05.19	
	Розробка схеми живлення п'єзоелектричного двигуна.	25.05.19	
	Обговорення результатів дослідження та написання дипломної роботи.	03.06.19	

Студент

_____ (підпис)

В.В. Гетманчук

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи

_____ (підпис)

С.П. Надкерничний

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

Реферат

П'єзоелектричний двигун - це тип електродвигуна, заснований на зміні форми п'єзоелектричного матеріалу при додатку електричного поля. П'єзоелектричні двигуни використовують зворотний п'єзоелектричний ефект п'єзоелектричних датчиків, в яких деформація або вібрація п'єзоелектричного матеріалу викликає електричний заряд. Електрична схема створює акустичні або ультразвукові коливання в п'єзоелектричному матеріалі, які виробляють лінійне або обертальний рух. В одному механізмі подовження в одній площині створює ряд розтяжок і положень, аналогічних тому, як рухається гусениця.

У 1947 році були отримані перші керамічні зразки титаната барію, і з цього моменту теоретично можливо виробництво п'єзоелектричних двигунів. Але перший такий двигун з'явився тільки 20 років по тому. Вивчаючи п'єзоелектричні перетворювачі в енергетичних режимах, співробітник Київського політехнічного інституту В.В.Лавриненко виявив обертання одного з них в утримувачі. Зрозумівши причину цього явища, в 1964 році він створив перший п'єзоелектричний двигун обертання, за яким послідував лінійний двигун для управління реле. Для першого двигуна з прямим контактом тертя він створює групи необоротних двигунів з механічним з'єднанням п'єзоелектричного елемента з ротором через штовхачі. Виходячи з цього, він пропонує десятки конструкцій необоротних двигунів, що охоплюють діапазон швидкостей від 0 до 10000 об / хв і діапазон крутного моменту від 0 до 100 Нм. Використовуючи два неоригінальних двигуна, Лавриненко спочатку вирішує проблему зворотного. Вбудований на валу одного двигуна він встановлює другий двигун. Він вирішує проблему моторного ресурсу, збуджуючи крутильні коливання в п'єзоелектричному елементі.

Abstract

Piezoelectric motor is a type of electric motor, based on the change of the shape of piezoelectric material with the application of an electric field. Piezoelectric motors use a reverse piezoelectric effect of piezoelectric sensors, in which the deformation or vibration of the piezoelectric material causes electric charge. The electrical circuit creates acoustic or ultrasonic oscillations in a piezoelectric material, which produce linear or rotational motion. In one mechanism of elongation in one plane creates a series of stretch marks and positions, similar to the way the caterpillar moves.

In 1947, the first ceramic samples of barium titanate were obtained, and from this moment on theoretically possible production of piezoelectric motors. But the first such engine appeared only 20 years later. Studying piezoelectric converters in power regimes, the employee of the Kiev Polytechnic Institute V.V. Lavrinenko found the rotation of one of them in the holder. Understanding the reason of this phenomenon, in 1964 he created the first piezoelectric motor of rotation, followed by a linear engine for controlling the relay. For a first friction direct contact, it creates groups of irreversible motors with a mechanical connection of a piezoelectric element with a rotor through the pusher. Accordingly, he offers dozens of designs for irreversible engines, covering a speed range from 0 to 10000 rpm and a range of torque from 0 to 100 Nm. Using two non-original engines, Lavrynenko initially solves the problem of reverse. Built on a shaft of one engine, he installs a second engine. He solves the problem of motor resource, excited by rotational oscillations in a piezoelectric element.

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів.

ПЄ — п'єзоелемент.

ПД — п'єзодвигун.

НПД — не лінійний п'єзодвигун.

ЛПД — лінійний п'єзодвигун.

Зміст

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	6
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. БУДОВА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ.....	11
1.1. Принцип роботи п'єзоелектричних двигунів.....	11
1.1.1. П'єзоелектричний ефект.....	12
1.1.2. Принцип весла.....	12
1.1.3. Резонанс в п'єзоелектричних пластинах.	14
1.1.4. Траєкторія руху п'єзоелемента в місці контакту з ротором.....	16
1.2. Будова п'єзоелектричних двигунів.	21
1.2.1. Кріплення і прижим осциляторів	23
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА.	29
2.1. Нереверсивні п'єзоелектричні двигуни зі збудженням деформації стиснення, розтягування і вигину.	29
2.2. П'єзоелектричні двигуни з пасивним ротором і збудженням коливань зсуву.	32
2.3. П'єзоелектричні двигуни з пасивним ротором і збудженням обертових коливань. ПД з пасивним статорм.....	34
РОЗДІЛ 3. ВИБІР МАТЕРІАЛУ П'ЄЗОКЕРАМІКИ ДЛЯ ДВИГУНА	38
3.1. Властивості п'єзокераміки.....	38
3.2. Зразки та характеристики п'єзокераміки різних виробників.	45
РОЗДІЛ 4. ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА.....	47

РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ЙОГО РОБОТУ	49
5.1.Дослідження п'єзоелемента номер 1.....	49
5.1.Дослідження п'єзоелемента номер 2.....	52
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	56
6.1.Загальні висновки з роботи.	56
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	58

ВСТУП

П'єзоелектричні двигуни засновані на застосуванні одного з багатьох відомих конструктивних принципів реалізації процесу перетворення електричної енергії в механічну. У п'єзоелектричних двигунах коливання п'єзопластин перетворюються в обертальний рух ротора; будь-які обмотки і магнітні поля в таких двигунах відсутні. У радіотехнічних пристроях п'єзодвигуни застосовуються в стрічкопротяжних і інших механічних приводах, магнітофонів і електрофонів; вони також використовуються в робототехніці. Перевагами п'єзодвигунів є економічність і простота конструкції, висока стабільність ходу, здатність до миттєвого включення і зупинки і відсутність магнітних полів (останнє особливо важливо для електромеханічних пристроїв магнітного запису).

Переваги п'єзоелектричних двигунів перед електромагнітними:

- широкий діапазон регулювання частот обертання (0 - 300 об. / хв);
- можливість малих, в межах обороту валу, переміщень (частки кутових секунд);
- високий момент на валу;
- мале енергоспоживання;
- іскровзривобезопасность;
- великий гальмівний момент на валу в знеструмленому стані;
- безінерційність;
- безшумна робота;
- малі маса і габарити.

Область застосування п'єзодвигунів:

- жорсткі безлюфтові, безредукторні електромеханічні виконавчі механізми з низькою швидкістю переміщень;
- високоякісний жорсткий безлюфтовий і безредукторний привід систем автоматичного регулювання швидкості та переміщень;
- електромеханічні пристрої, ефективно замінюють силові електромагніти.

РОЗДІЛ 1. БУДОВА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ.

1.1. Принцип роботи п'єзоелектричних двигунів.

Основним матеріалом для п'єзодвигунів є поляризована кераміка. Місце контакту керамічної пластини з обертовим ротором виконується з твердих матеріалів (металів і металокераміки), стійких до зносу: від довговічності цього механічного контакту залежить термін служби п'єзодвигунів.

У двигунах можуть бути збуджені коливання стиснення - розтягнення, вигину, зсуву, крутильні і радіальні коливання. Сполучення цих видів коливань призводять до можливості створення великого числа істотно різних конструкцій п'єзодвигунів: нереверсивними і реверсивних, з п'єзоелектричних пасивним ротором і активним статором, з п'єзоелектричних активним ротором і пасивним статором, з електричним збудженням коливань одного і двох типів. Велике значення має розробка більш зносостійких матеріалів, що дозволить довести ресурс п'єзодвигуна до сучасного рівня.

Процес перетворення коливань п'єзокерамічного кільця в поступальний (обертальний) рух ротора (механічне детектування) здійснюється наступним чином:

- при включенні генератора механічні коливання п'єзокерамічного кільця через штовхачі передаються на ротор;
- в області фрикційного контакту штовхачів з ротором вектори сил, переданих штовхачами, розкладаються на складові - складову вздовж радіуса ротора і складову, спрямовану по дотичній до окружності ротора;
- остання складова призводить ротор в обертальний рух, швидкість обертання ротора при цьому пропорційна амплітуді механічних коливань кільця.

1.1.1.П'єзоелектричний ефект.

Як відомо, деякі тверді матеріали, наприклад кварц, здатні в електричному полі лінійно змінювати свої розміри.

П'єзоелектричний двигун(П.Д.) може бути виконаний як з тих, так і з інших матеріалів. Відомі прямий і зворотний п'єзоелектричні ефекти. Прямий ефект - це поява електричного заряду при деформації п'єзоелемента. Зворотний ефект - це лінійне зміна розмірів п'єзоелемента при зміні електричного поля. Кристали, в яких спостерігається п'єзоелектричний ефект, мають полярні властивості. Вони проявляються в тому, що прикладені до кристалу сили створюють електричне поле певного напрямку.

Тому при деформації полікристалічних (керамічних) тіл, що складаються з великого числа хаотично орієнтованих кристалів, сумарне електричне поле виявиться близьким до нуля. Існують п'єзоелектричні матеріали, названі сегнетоелектриками, в яких напрямок полярної осі можна змінювати при додаванні досить сильних електричних полів. Під дією зовнішнього електричного поля полярні осі кристалітів орієнтуються переважно в одному напрямку. Після відключення поля кристалітів мають однакові напрямки полярних осей і виявляються як би «замороженими». Така властивість сегнетоелектриків дозволяє робити полікристалічні матеріали полярними шляхом електричної обробки, яка називається поляризацією.

Практично п'єзоелемент ПД може бути виконаний з монокристалічного пьезоелектрика. Однак зараз через відсутність кристалів з необхідним набором властивостей п'єзоелементи двигуна доцільно виготовляти з дешевих п'єзокерамічних полікристалічних матеріалів.

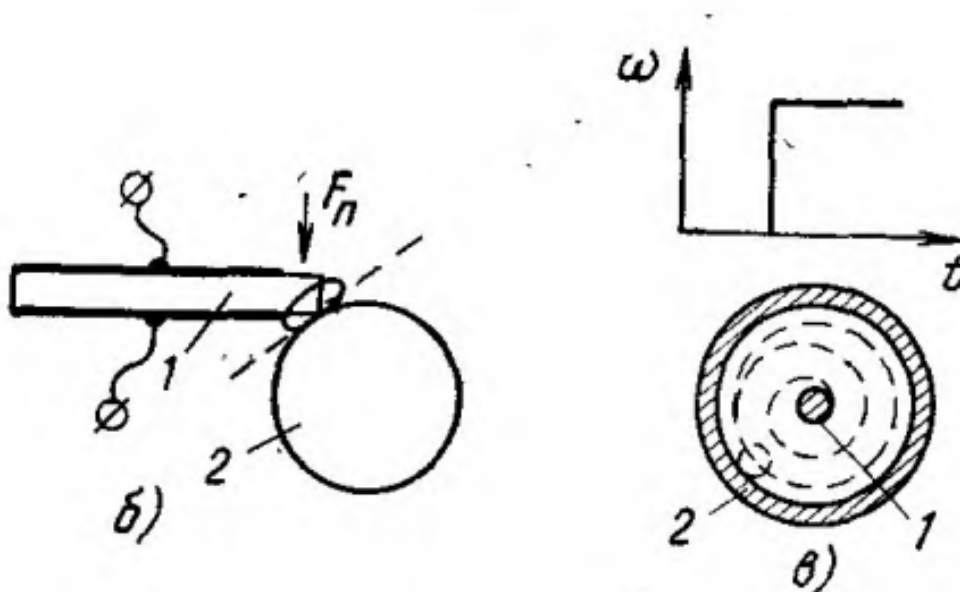
1.1.2. Принцип весла

Згадаймо, як рухається човен по воді . За час, протягом якого весло торкається до води, його рух перетвориться в лінійне переміщення човна; в паузах між гребками човен рухається за інерцією. Перший двигун, заснований

на цьому принципі, був створений в Радянському Союзі. При дослідженні п'єзоелектричних трансформаторів було виявлено ледь помітний рух п'єзоелемента в тримачі при збудженні його електричною напругою. На підставі виявленого ефекту і був спроектований п'єзоелектричний двигун.

Цей двигун містить п'єзоелектричний елемент (рис. 1.б), виконаний у вигляді прямокутної пластини, яка одним кінцем притискається зовнішньою силою до поверхні ротора 2. При електричному збудженні п'єзоелемента цей кінець, як і лопата весла, переміщається по замкнутій траєкторії, періодично віддаючи імпульс руху ротора.

Щоб виявити принципову відмінність цього ПД від двигуна (рис.1,в) , розглянемо перехідний процес, що починається в момент включення обох двигунів при відсутності навантаження на валу.



Р

ис.1.Схема взаємдії п'єзоелемента з ротором(F_n -сила прижиму).

У двигуні (рис. 1, в), поводок 1 знаходиться в центрі ротора 2 і не зчеплений з ним. У міру накопичення енергії в п'єзоелементі поводок переміщається по спіралі, не зачепляючись з ротором; при цьому ротор не обертається. З моменту зчеплення повідця з ротором рух повідця відбувається по колу постійного радіуса

з постійною частотою обертання, рівній частоті напруги живлення що не залежить від цієї напруги. У двигуні(рис. 1,б), п'єзоелемент в момент включення вже притиснутий до поверхні ротора; отже, з самого початку порушення коливань їх енергія перетворюється в кінетичну енергію обертання ротора.

Чим більша частота і амплітуда коливань, тим більша частота обертання ротора. Таким чином, частота коливань п'єзоелемента не обмежена амплітудою його коливань і діаметром ротора. Тому збільшуючи частоту, можна збільшувати потужність на валу двигуна. Обмеження потужності двигуна пов'язані з його перегрівом, руйнуванням п'єзоелемента, підвищенням зносом контактуючих поверхонь і іншими факторами. Однак ці явища спостерігаються при питомих потужностях, які в кілька разів перевищують потужності, характерні для кращих електромагнітних аналогів (по крайній мірі з потужністю на валу менше 10 Вт).

1.1.3. Резонанс в п'єзоелектричних пластинах.

Якщо до п'єзоелектричної пластини з електродами на протилежних сторонах докласти електричну напругу, то на кінцях пластини виникнуть сили стиснення і розширення, Розглянемо хвилю, яка зароджується, наприклад, на лівому кінці п'єзопластини (рис. 2, а). Ця хвиля поширюється в поздовжньому напрямку і досягає протилежного кінця пластини. потім вона відбивається від нього, не змінюючи фази, і прямує назад до лівого кінця пластини, відбивається від нього і так далі до тих пір, поки за рахунок механічних і електричних втрат в пластині хвиля не загасне.

При стисненні (або розширенні) зміщення частинок відбувається в тому ж напрямку, в якому відбувається поширення хвилі. Такі хвилі називаються поздовжніми на відміну від поперечних, у яких зміщення частинок перпендикулярно напрямку їх поширення. В даному випадку напрямок електричного поля був перпендикулярний напрямку поширення хвилі. Можливий також випадок, коли електроди розташовані на торцях п'єзопластини. Тоді

напрямок електричного поля паралельно напрямку поширення хвилі. Відповідно до цього розрізняють поперечний і поздовжній способи збудження поздовжніх коливань або хвиль. До цих пір розглядалася хвиля, що біжить.

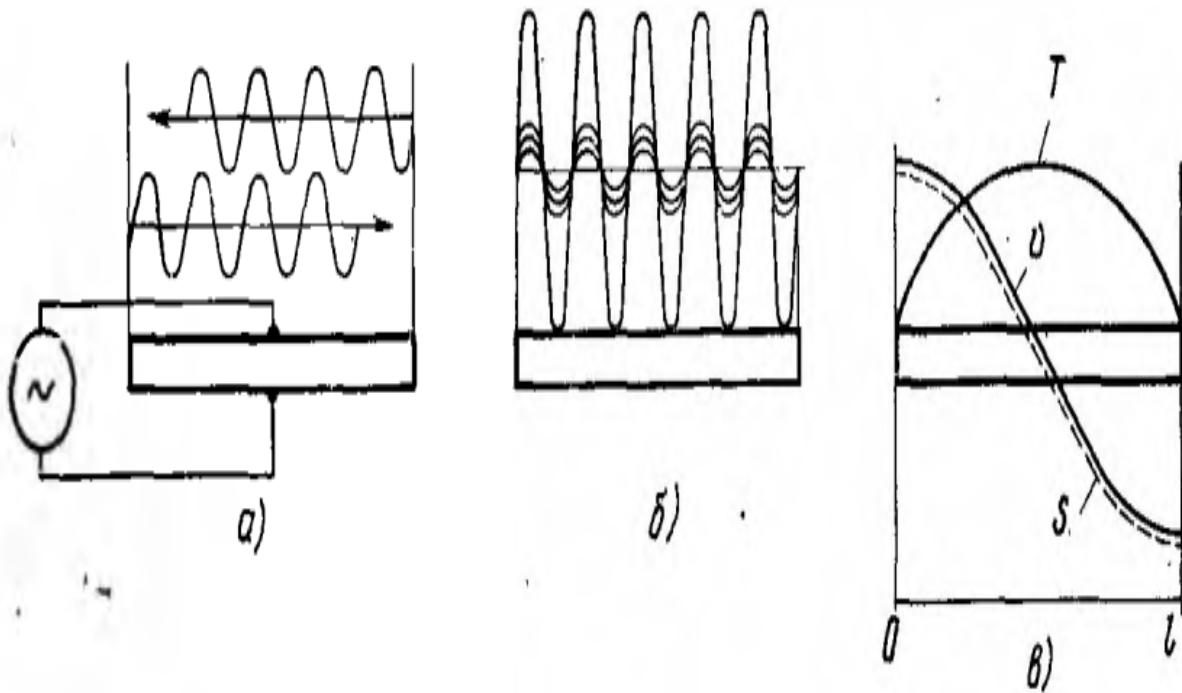


Рис. 2. Розподіл деформацій уздовж п'єзоелемента.

Якщо скласти всі прямі і відбиті біжучі хвилі в п'єзопластині, то отримаємо криву розподілу зсувів в стоячій хвилі (рис. 2,б). Амплітуда зсувів в такій хвилі максимальна тоді, коли на довжині п'єзопластини укладається ціле число півхвиль. Ця умова виконується для певних частот збудження п'єзопластини f_m названих резонансними.

Умова резонансу має вигляд:

$$f_m = \frac{c}{\lambda} = \frac{cm}{2l}, \quad (1.1)$$

де c - швидкість звуку в п'єзопластині; λ - довжина хвилі збуджуючих коливань; m - номер моди коливань, тобто число, що показує, скільки півхвиль укладається на довжині l п'єзопластини; першу моду називають також основний.

Швидкість звуку в п'єзоелектричній пластині, в якій порушуються поздовжні коливання, визначається за формулою

$$c = \sqrt{\frac{Y_1^E}{\rho}}, \quad (1.2)$$

де Y_1^E - модуль Юнга; ρ - щільність матеріалу.

Тому умова резонансу має вигляд:

$$f_m = \frac{\sqrt{\frac{Y_1^E}{\rho}} \cdot m}{2l}, \quad (1.3)$$

Ця формула використовується для визначення довжини п'єзоелемента по заданій робочій частоті двигуна в разі, коли п'єзоелемент виконаний у вигляді прямокутної пластини з електродами на бічних поверхнях. Розглянемо основну моду поздовжніх коливань п'єзоелемента, в якому порушені стоячі хвилі. Положення рівноваги кожний перетин проходить з максимальною швидкістю. Кожна координата x характеризується своїми значеннями амплітуд напруги T , зміщення S і швидкості коливань v ; епюри їх розподілу по довжині зразка показані на рис. 2 в. Таким чином, для вільного п'єзоелемента при основній моді поздовжніх коливань механічне напруження максимально в місці мінімуму коливальних швидкостей або зсувів. На кінцях вільного п'єзоелемента напруга дорівнює нулю, а зміщення і коливальна швидкість максимальні.

Так як епюри отримані в результаті складання відрізків синусоїдальної напруги, результуюча крива має форму синусоїди.

1.1.4 Траєкторія руху п'єзоелемента в місці контакту з ротором.

Якщо маятнику повідомити рух в двох взаємно перпендикулярних площинах, то він буде описувати еліпс, відношення осей якого залежить від амплітудних і фазових співвідношень між примушуючими силами. У разі рівного розподілу амплітуд цих сил і зсуві фаз на 90° маятник буде рухатися по колу.

Аналогічно, якщо в п'єзоелементі одночасно порушено взаємно

перпендикулярні незв'язані (або слабо пов'язані) коливання, то кінець п'єзоелемента А рухається по еліпсу (рис. 3, а). Два типи коливань назвемо непов'язаними, якщо одне з них не збуджує інше, тобто якщо вони існують незалежно. Прикладом незв'язаних коливань є поздовжні і згибні коливання. Прикладом зв'язаних коливань можуть служити поздовжні коливання по довжині і ширині п'єзопластини, а також згибні коливання по її довжині і ширині. Якщо коливання є пов'язаними, то на резонансних частотах зсув фаз між ними дорівнює нулю.

Розглянемо два взаємно перпендикулярно розташованих п'єзоелемента (рис. 3,б), в яких порушено поздовжні коливання зі зсувом фаз 90° . Здавалося б, якщо з'єднати кінці п'єзоелементів (точки А), то точка з'єднання буде рухатися по колу. Насправді ж траєкторією руху буде пряма, показана на малюнку пунктиром. При акустичному з'єднанні п'єзоелементів (в точках А) поздовжні хвилі проникають з одного елемента в інший. Змішуючись між собою, вони стають в точці з'єднання невиразними. Якщо в п'єзоелементі порушено поздовжні і згибні коливання однієї частоти, то при зсуві фаз між ними, відмінному від нуля, траєкторією руху точки А є еліпс. Назвемо кут зсуву фаз між порушуваними коливаннями кутом траєкторії ψ . Для однакових амплітуд поздовжніх і згинних коливань ($A_{\text{п}} = A_{\text{п}}$) траєкторії руху точок на торці п'єзоелемента показані на рис. 4, а, а для різних амплітуд - на рис. 4,б. Можливо також рух точки по замкнутій кривій з постійною швидкістю. У нерезонансному режимі такий рух відбувається

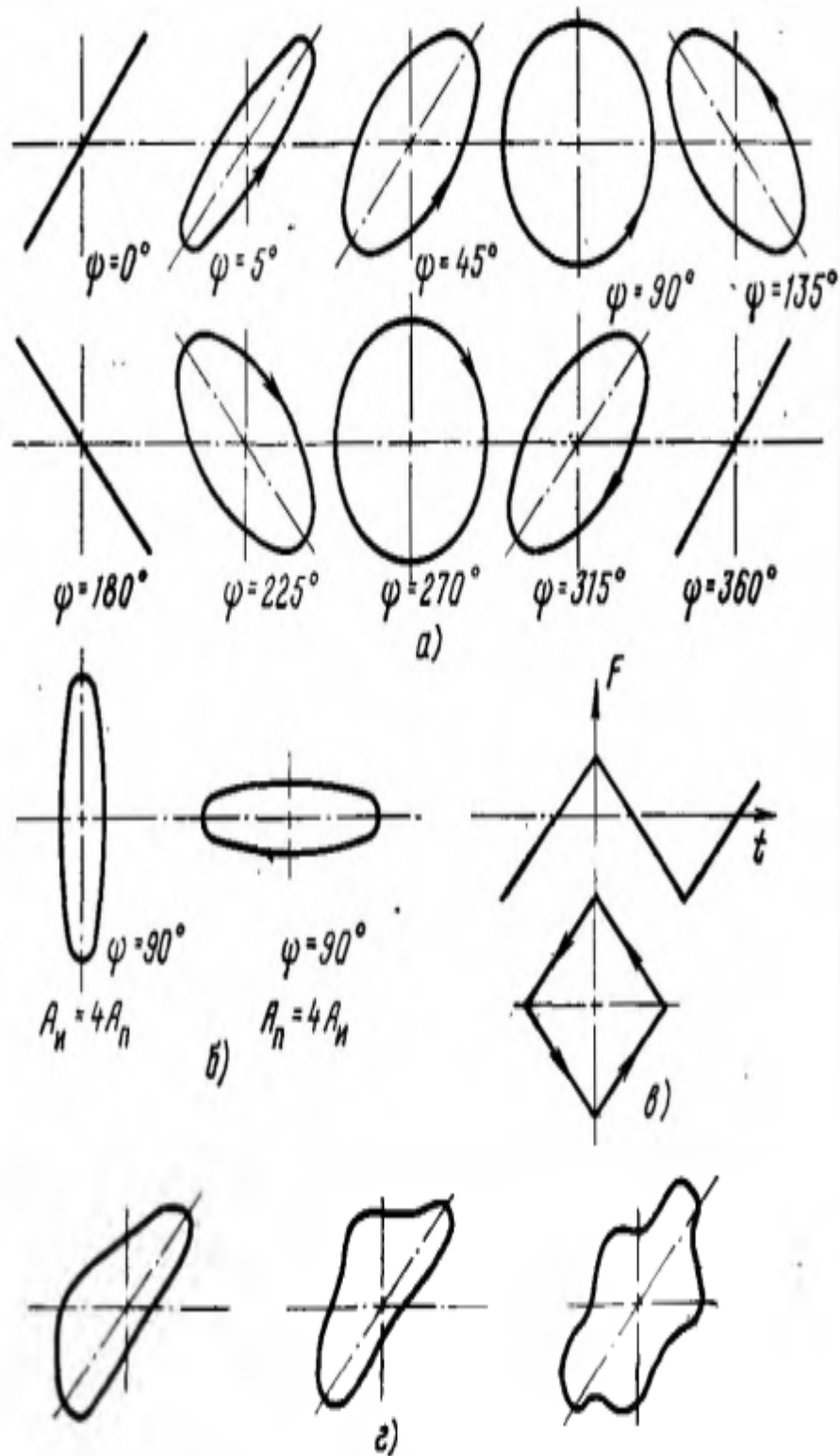
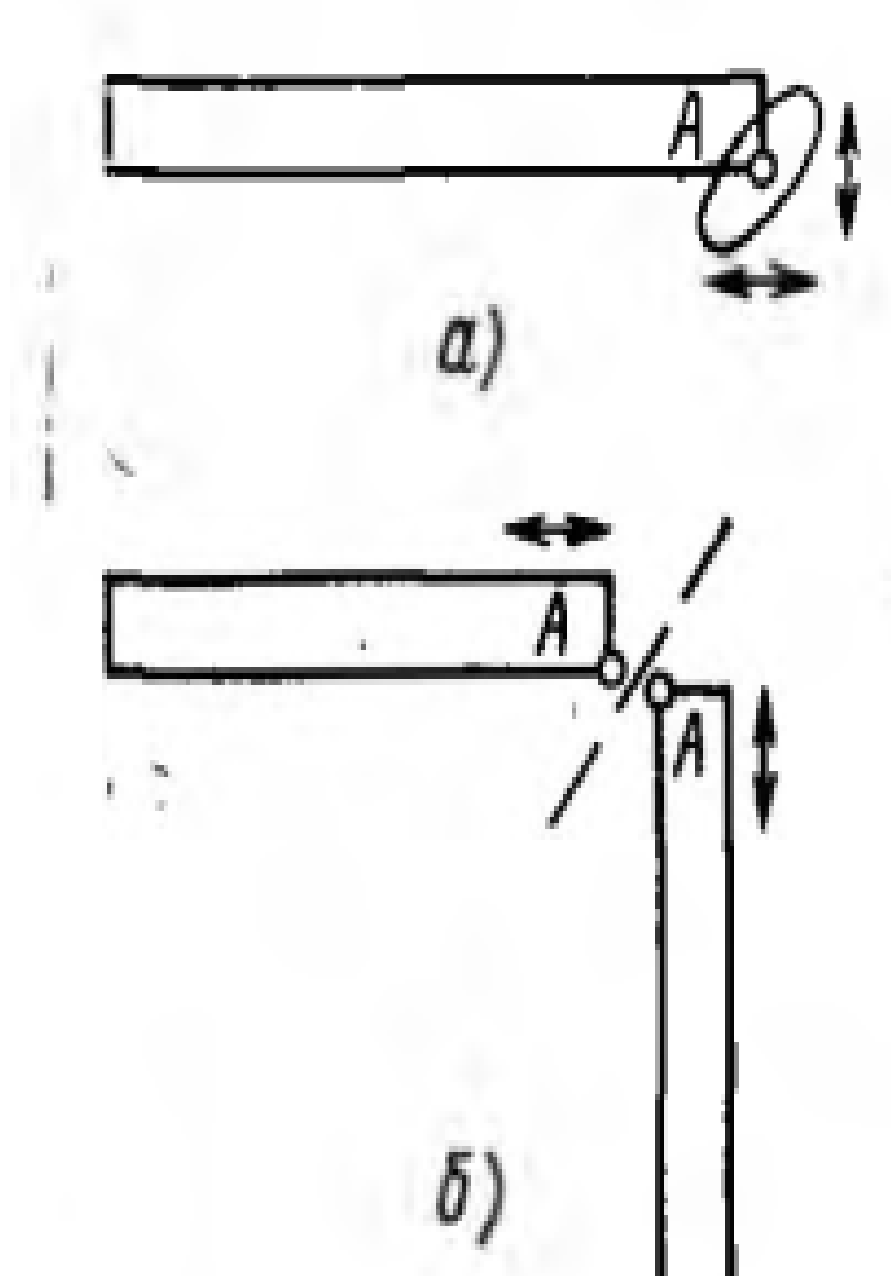
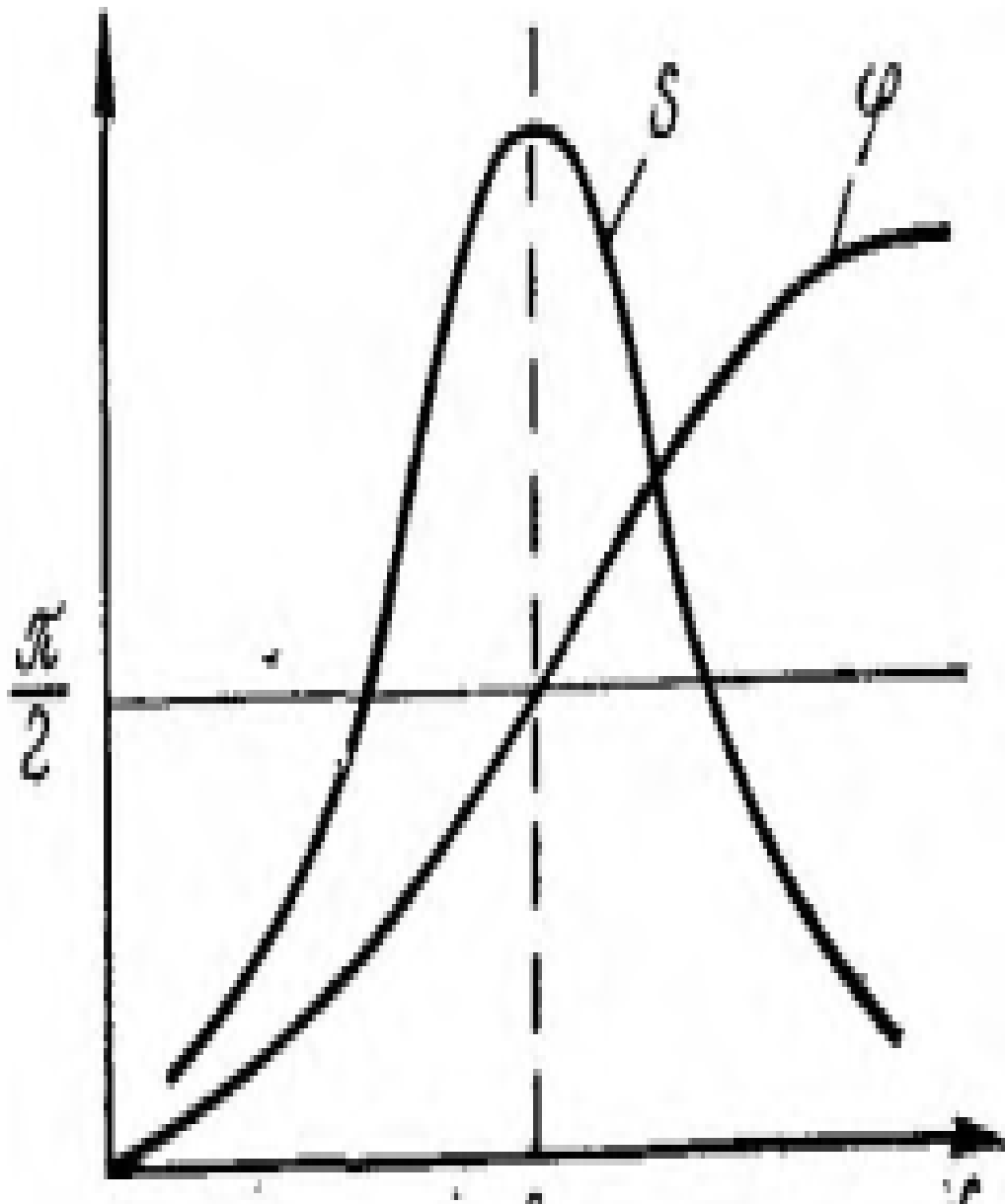


Рис. 4. Траєкторії руху точок на кінцях п'єзоелементів при різних співвідношеннях між амплітудами повздовжніх і згинних коливань.



під дією сили, що вимушує, що змінюється за законом пилки (рис. 4, в). При полігармонійному зміні сили, що вимушує форма еліпса спотворюється (Рис. 4, г). Поперечна сила на кінці поздовжньо зміщується п'єзоелемента виникає при його взаємодії з поверхнею ротора. Ця сила пропорційна зсуву і збігається з ним по фазі. Для розуміння принципу роботи двигуна важливо знати фазові співвідношення між взаємно перпендикулярними коливаннями. На рис. 5 показані частотні залежності амплітуди зміщення S і зсуву фаз ϕ між зміщенням і електричною напругою

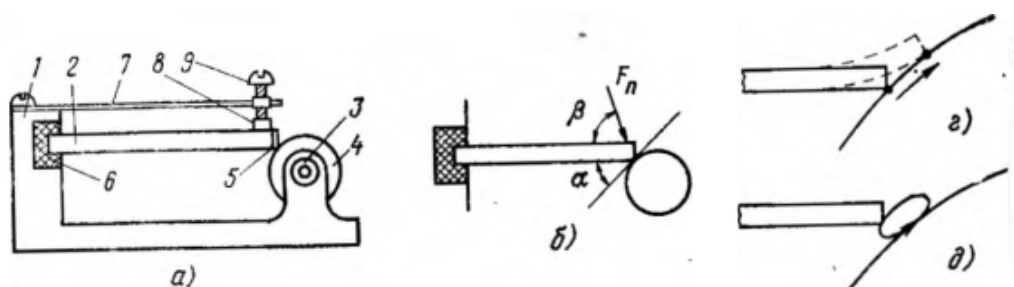


поблизу резонансу для першої моди поздовжніх коливань п'єзоелемента. В околиці резонансу зсуву фаз змінюється від нуля до π , на частоті резонансів f_p він дорівнює $\pi/2$. За таким же законом змінюються амплітуда і фаза зміщення кінця п'єзоелемента в поперечному напрямку; відмінність полягає в тому, що різниця фаз відраховується від фази зміщення кінця п'єзоелемента в поздовжньому напрямку.

1.2.Будова п'єзоелектричних двигунів.

Розглянемо ПД широко застосовується конструкції. (Рис. 6, а). Основними елементами двигуна є статор і ротор. На підставі статора 1 встановлені п'єзоелемент 2 і підшипники 3. До основи кріпиться також корпус (на малюнку не показаний); корпус в деяких випадках може бути поєднаний з підставою. В якості підстави можуть використовуватися панелі, шасі приладів, наприклад панель механізму протягування стрічки магнітофона. Ротор 4 зазвичай виконується з твердих матеріалів (сталь, чавун, твердий сплав, кераміка та ін.); він являє собою тіло обертання з гладкою поверхнею. Якщо необхідно отримати складну кутову залежність для моменту обертання, ротор повинен мати форму ексцентрика з одним або декількома виступами.

Невід'ємною частиною ПД є акустично ізольована від заснування і осі ротора електромеханічна коливальна система - осцилятор (вібратор).



ис. 6. Конструкції ПД.

У найпростішому випадку осцилятором є п'єзоелемент разом з зносостійкою прокладкою 5. Якщо осцилятор виконаний у вигляді прямокутної пластини, то її кінець притиснутий до поверхні ротора, а інший закріплений на підставі за допомогою еластичної прокладки 6, наприклад, із фторопласта, гуми та ін. Важливою частиною ПД є елемент притиску; він може бути виконаний у вигляді плоскої сталеві пружини 7, кінець якої через еластичну прокладку 8 тисне на кінець осцилятора. Для зміни сили притиску на кінці пружини часто встановлюють регульовальний гвинт 9. Кут β між напрямком сили притиску і поверхнею осцилятора називається кутом притиску (рис. 6,б). Осцилятори стосуються поверхні ротора під певним кутом, званім кутом контакту α . Цей гострий кут утворений площиною, паралельною поздовжньої осі осцилятора, і дотичній площиною, що проходить через лінію контакту осцилятора з ротором.

Зовнішній вигляд лабораторних і дослідних зразків ПД, цієї конструкції наведено на рис. 6, в.

При створенні моделі ПД були прийняті такі припущення:

1. Поперечні коливання є вигинистою і збуджуються при відображенні поздовжніх коливань від поверхні ротора.

2. Обертання ротора обумовлено заклинюванням при зміщенні кінця осцилятора в одному напрямку і розклиненням при зміщенні в зворотному напрямку. Експерименти, виконані авторами, остаточно підтвердили механізм фрикційного взаємодії незв'язаних поздовжніх і згинних коливань осцилятора і дозволили створити модель, яка ілюструє основні фізичні процеси в ПД.

Відповідно до цієї моделі при підключенні двигуна до джерела змінної напруги з частотою, близькою до резонансної частоти поздовжніх коливань, в осциляторі встановлюються стоячі поздовжні хвилі. Будемо вважати, що осцилятор стосується ротора в одній точці при одновимірній моделі і вздовж лінії при двовимірній моделі. Цю точку або лінію назвемо контактної. Контактна точка, зміщуючись в поздовжньому напрямку, переміщається з поверхнею ротора

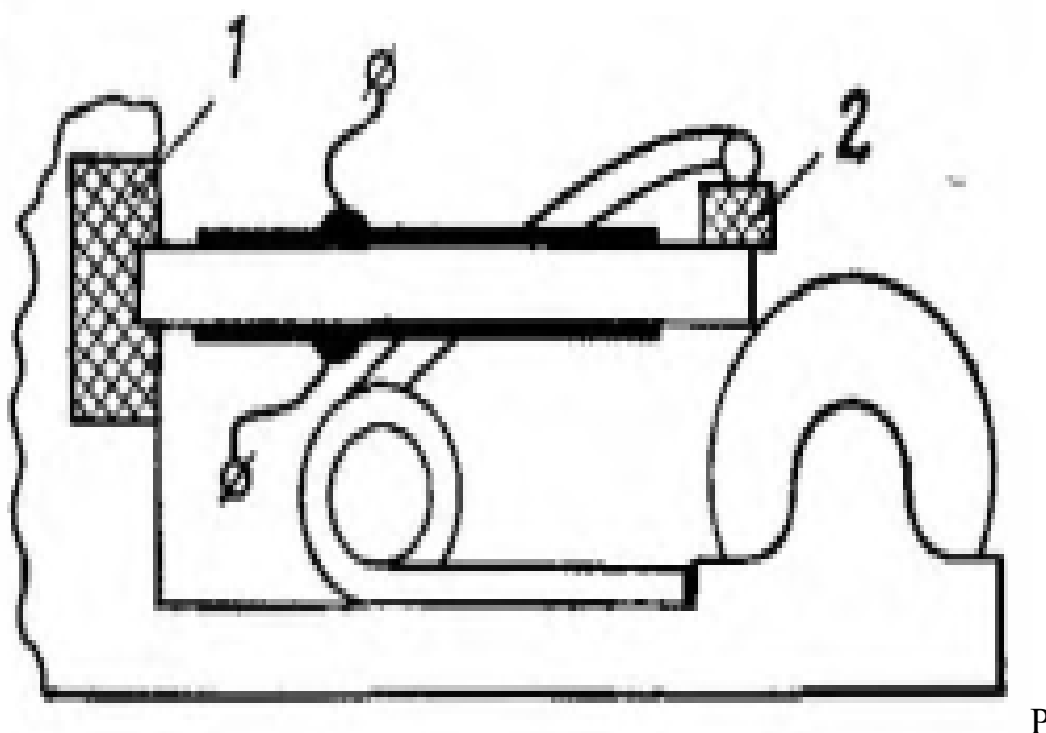
(Рис. 6, г), а отже, зміщується і в поперечному напрямку. Частина поверхні ротора, з якої взаємодіє контактна точка (лінія) протягом одного періоду коливань, назовемо зоною контакту. Таким чином, переміщення контактної точки в зоні контакту призводить до появи поперечної складової сили, яка збуджує стоячі хвилі вигину на частоті, близькій до резонансної. В результаті контактна точка додатково зміщується в поперечному; напрямку за рахунок резонансних згинальних коливань. Зрушення фаз між поздовжніми і вигинистою коливаннями може змінюватися в межах від 0 до 180° в залежності від співвідношення між обраної робочої частотою двигуна і резонансною частотою коливань вигину. При зсуві фаз, відмінному від 0 і 180° , контактна точка рухається по еліпсу (рис. 6,д). У момент дотику з ротором вона притискається до його поверхні, входить у фрикційне зачеплення і передає ротора односпрямований імпульс руху. При це осцилятор отримує імпульс поперечної сили, компенсуючий втрати енергії згинальних коливань.

1.2.1. Кріплення і прижим осциляторів

Для зменшення втрат акустичної енергії осцилятор двигуна повинен бути надійно ізольований.

У найпростішому випадку його слід уперти в звукоізоляційні прокладку 1 (рис. 7), виконувану з гуми або інших матеріалів з низькою питомою хвильовим опором. Закріплення кінця осцилятора через прокладку будемо називати торцевих; на відміну від консольного воно забезпечує відносну свободу переміщення кінця осцилятора в поздовжньому і поперечному напрямках. Чим більше розходження між хвильовим опорами осцилятора і звукоізоляційні прокладки, тим більша частина падаючої на прокладку акустичної енергії відбивається в осцилятор.

Притиск осцилятора також доцільно здійснювати через звукоізоляційні еластичну прокладку. Така прокладка 2 зменшує втрати акустичної енергії через підставу двигуна. Кріплення осцилятора в місці максимуму зміщення завдяки своїй простоті використовується найбільш часто. Проте, втрати енергії через звукоізоляційні прокладку досить відчутні і знижують к. п. д. двигуна в середовищ ньому на 15%.



ис. 7. Конструкція ПД.

Акустична ізоляція поліпшується, якщо кріплення здійснюється в місці мінімуму зсувів. Для знаходження цього місця будують епюри зсувів для поздовжніх і згинних коливань. Для коливань другий і третьої мод вигину зазначені епюри наведені на Мал. 8, а, б. З малюнків випливає, що для осциляторів з парної модою коливань вигину існує геометричне місце точок (лінія в центрі пластини), зміщення яких дорівнюють нулю. Уздовж цієї лінії роблять отвір, в яке вставляють тонкий сталевий стрижень для кріплення осцилятора (рис. 9, а).

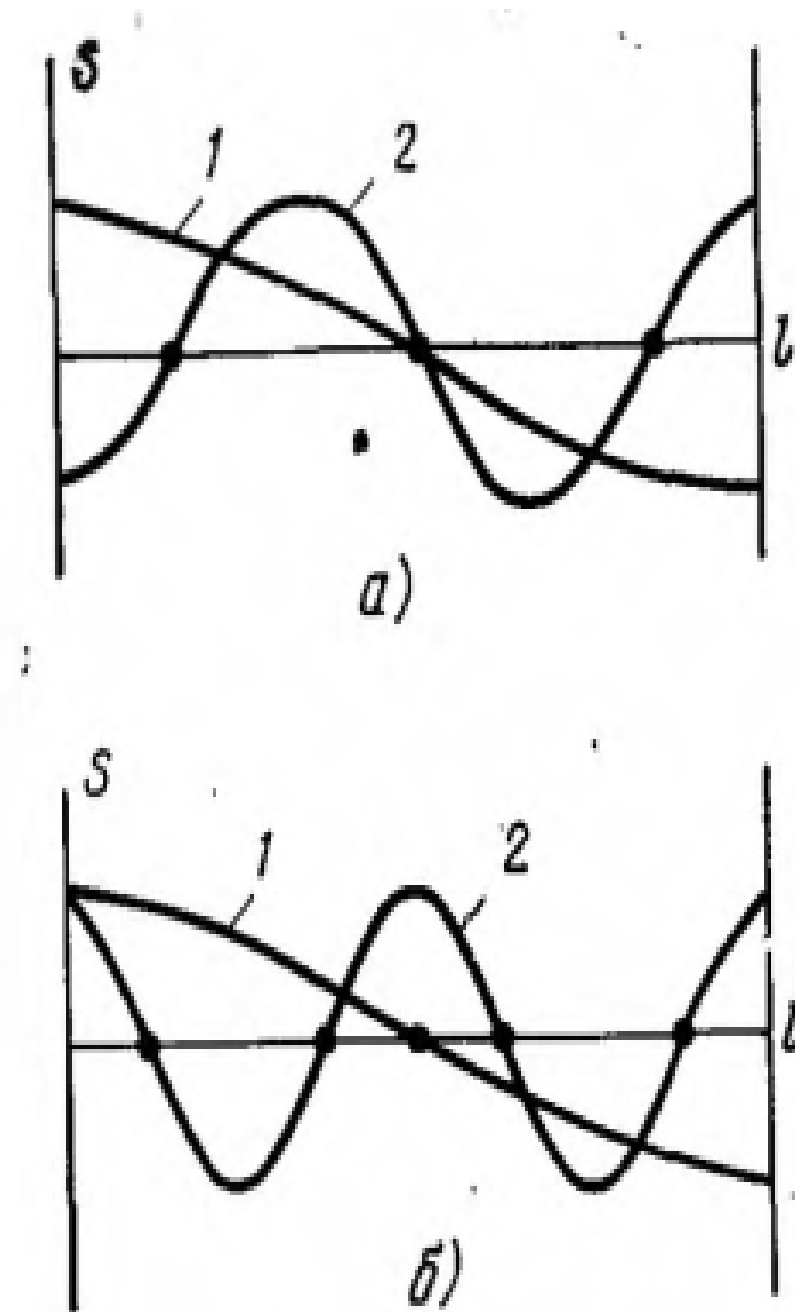
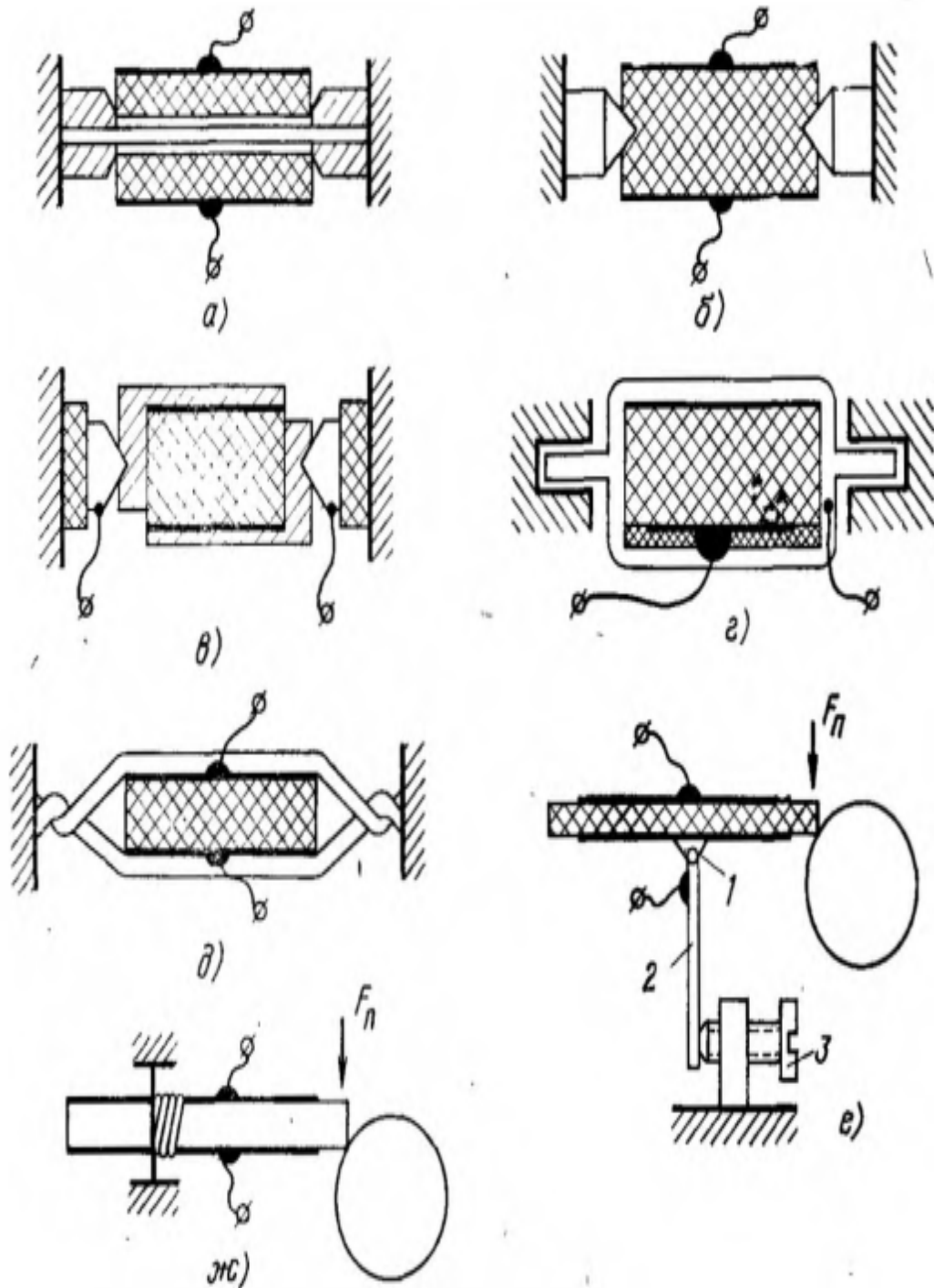


Рис.8. Епюри зміщень для повздовжніх(1) і згинних(2) коливань осцилятора другої(а) і третьої(б) моди.

Мономорфні осцилятори простіше закріплювати в центрах (рис. 9,б). Для збільшення міцності осцилятора його постачають сталевими прокладками, зазвичай сполучаються з електродами (рис. 9, в).



с.9. Варіанти кріплення осцилятора.

Pu

Досить ефективним є кріплення в рамці (рис. 9, г), яку приклеюють або припаюють до осцилятора. Рамку можна також використовувати для підключення одного з електродів осцилятора.

У мікромініатюрних двигунах осцилятор закріплюють. в гумовій або поліуретановій петлі (Рис. 9,б), а в двигунах годинникових механізмів до осцилятора припаюють тонкий волосок 1 (рис. 9, е), встановлених в підшипниках (на малюнку не показані). Перпендикулярно йому припаюють тонку плоску пружину 2, яка впирається в гвинт 3, який регулює силу притиску осцилятора. Кріплення в рамках використовують і для осциляторів з непарної модою коливань вигину. У цьому випадку на осциляторі роблять бандаж з ниток, просочених епоксидним клеєм (рис. 9, ж). Розміщуючи таку рамку ближче до лінії мінімуму зсувів поздовжніх або згинальних коливань, можна формувати необхідну траєкторію руху точок в зоні контакту. Крім описаних пристроїв, для притиску осцилятора до ротора відомо багато інших. В якості силових елементів використовують плоскі або кручені пружини, а також гумові та поліуретанові шнури або прокладки (шнури працюють на розтягнення, прокладки на стиснення). У двигунах, які використовуються для транспортування стрічки, можуть використовуватися також силові елементи у вигляді постійних магнітів і електромагнітів.

Часто в пристроях притиску використовують гнучкі передачі та важелі. Вибір тієї чи іншої конструкції диктується в основному раціональною компоновкою елементів двигуна.

В даний час найбільш широко використовується притиск в безпосередній близькості до лінії контакту осцилятора з ротором, тобто в місці максимальних зсувів п'єзоелемента (рис. 10, а). На рис. 10,б показано притискний пристрій, який виключає втрати акустичної енергії на притиск. У цій конструкції осцилятор здійснює поздовжні коливання другої моди і ізгібні коливання парній моди.

Як показали дослідження лабораторних зразків, на роботу ПД впливає і конструкція висновків п'єзоелемента. Мінімальна загасання вносять висновки у вигляді тонких провідників з мідної або латунної дроту діаметром 0,02-0,07 мм. висновок п'єзоелемента є концентратором енергії акустичних коливань.

Концентрація механічних напруг часто призводить до руйнування

висновків, особливо при наявності в них дефектів. Для збільшення надійності висновків їх скручують в джгутики, що складаються з п'яти і більше жил. Для висновків використовують також провід МГТФ. Фторопластова ізоляція таких проводів вносить загасання в резонатор, утворений виводом, і зменшує тим самим механічні напружки в провідниках. Місце спайки виведення з електродом доцільно обволікати звукопоглинальним матеріалом. Для цих цілей зручно, наприклад, використовувати клей ПВА, краплю якого наносять на місце з'єднання виведення з електродом.

Для зменшення загасання, що вноситься висновком, його необхідно закріплювати в місці мінімуму згинальних коливань. Це дозволяє зменшити відгалуження акустичної енергії в вивід.

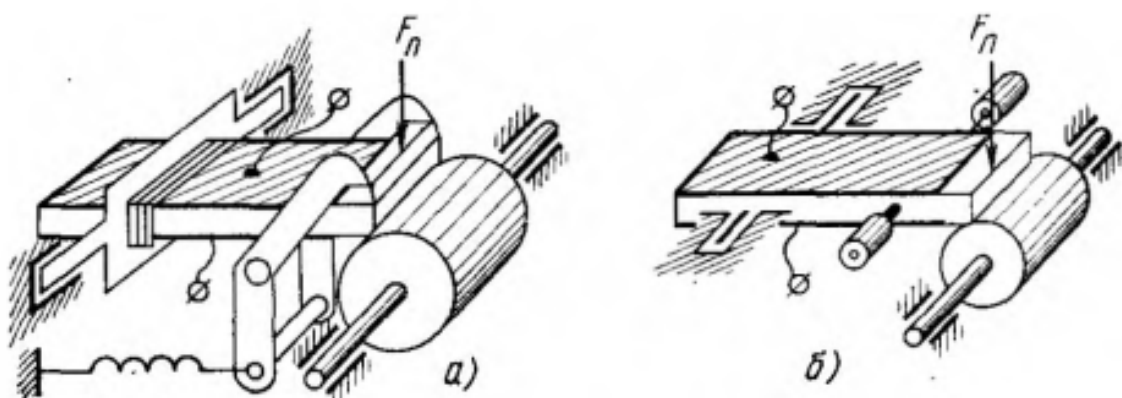


Рис.10.Конструкції прижимних конструкцій.

Електроди можна підключати до джерела і за допомогою контактів. Кращі результати були отримані при використанні графітних контактів. слід мати на увазі, що шар електрода в місці механічного контакту під дією ультразвуку руйнується. Тому при використанні притискних контактів електрод в місці контакту повинен бути потовщений, наприклад, шляхом подпайки бронзової пластинки.

Контактний висновок зручно поєднувати з елементом притиску, а також з місцем закріплення осцилятора. Застосування контактних висновків виправдано в тих випадках, коли потрібно багаторазова заміна відпрацьованих осциляторів.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА.

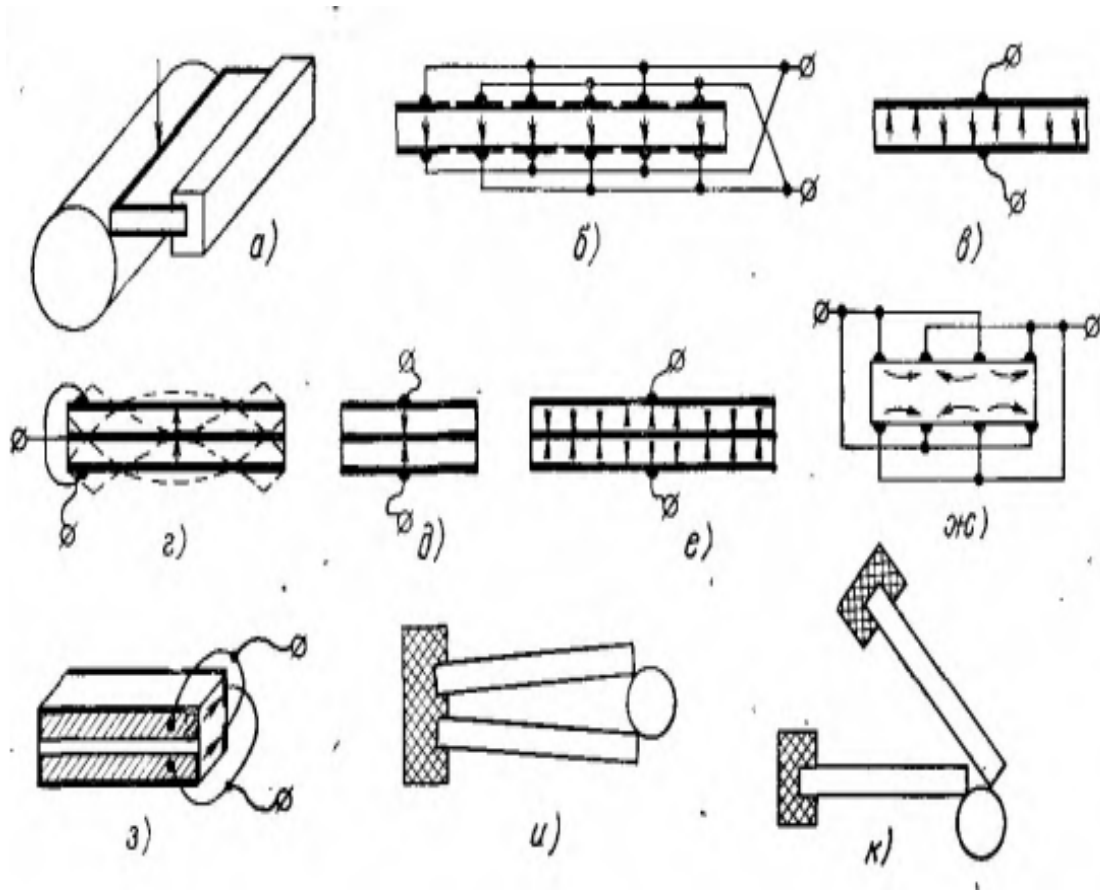
2.1. Нереверсивні п'єзоелектричні двигуни зі збудженням деформації стиснення, розтягування і вигину.

Всі ПД можна класифікувати наступним чином: нереверсивні і реверсивні (НПД і РІ Д); з п'єзоелектричних пасивним ротором і активним статором, з п'єзоелектричних активним ротором і пасивним статором, з електричним збудженням коливань одного типу і двох типів. У двигунах можуть бути порушені коливання стиснення - розтягнення, вигину, зсуву, крутильні і радіальні коливання. Сполучення цих коливань по два призводять до великої кількості істотно різних конструкцій ПД. Крім того, всі ці коливання можуть порушуватися з різних напрямків осцилятора, наприклад можливі коливання зсуву по товщині, ширині, довжині. Описати докладно всі конструкції ПД тут не представляється можливим, тим більше що багато хто з них ще недостатньо вивчені. Тому в подальшому спробуємо сформулювати тільки загальні принципи побудови конструкцій, дотримуючись поділу ПД на три класи: з пасивним ротором, з пасивним статором і активними ротором і статором. Раніше розглянутий двигун (див. Рис: 9, а) відноситься до НПД, так як його реверс неможливий (або не ефективний) ні при комутації електродів, ні при зміні частоти напруги живлення. У цій конструкції електрично збуджуються тільки поздовжні коливання по довжині пластини; поперечні (ізгібніе) коливання збуджуються при взаємодії осцилятора з ротором.

Конструкція двигуна істотно не зміниться, якщо вісь ротора розташувати паралельно пластині (Рис. 11, а). При цьому робочу частоту ПД вибирають приблизно рівною частоті резонансу пружних коливань по ширині пластини. В такому випадку значно збільшуються площа механічного контакту осцилятора з

ротором і потужність на валу двигуна. Резонансні коливання можна порушити і по товщині пластини. Однак цей випадок зустрічається рідко і практичного інтересу не представляє.

Потужність ПД на даній частоті можна збільшити, підвищуючи номер моди пружних коливань. Для цього п'єзoeлемент ділять на зони з однаковими значеннями механічної напруги.



Ри

с.11. Конструкція НПД.

Ці зони виділяють або електродами (рис. 11, б), яким напрямком поляризації зон (рис. 11, в). Відомі також конструкції НПД, в яких електрично збуджуються коливання вигину, а поздовжні коливання генеруються механічно. Коливання вигину можна порушувати декількома способами, схематично показаними на рис. 11, г - з. В надалі деформаціями «чистого» вигину будемо називати електрично збуджуються деформації вигину, які не супроводжуються стисненням -

розтягуванням. При «чистому» вигині по товщині є шар, площа якого при деформації пластини залишається незмінною. Частини, розташовані по обидва боки від цього шару, мають однакову п'єзоактивних, т. з. при додатку електричного поля на їх кінцях розвиваються сили, однакові за величиною і протилежні за напрямком. Неоднорідність матеріалів п'єзоелементів по п'єзоелектричним або пружним властивостям, відмінність товщини або площ електродів призводять до того, що разом з деформаціями згину порушуються деформації стиснення - розтягнення, які, складаючись з механічно порушуваними поздовжніми деформаціями, можуть істотно погіршити параметри НПД. Параметри двигуна з електричним збудженням поздовжніх коливань можуть істотно погіршитися через коливань вигину, обумовлених, наприклад, неоднорідністю матеріалу.

Для суміщення згинального і поздовжнього резонансів номер моди коливань вигину повинен бути вище номера моди поздовжніх коливань. Для цього п'єзоелемент поділяють на зони, число яких має дорівнювати номеру моди згинальних коливань. Зони виділяють напрямком поляризації (рис. 11, е) або електродами (Рис. 11, ж, з). У кожній зоні механічні напруги мають однакові напрямки.

Нереверсивні ВМД з електричним збудженням коливань вигину за своїми параметрами поступаються НПД з електричним збудженням коливань стиснення - розтягнення; їх осцилятори є більш складними за конструкції, а ротори обертаються в протилежному напрямку. При виключенні напруги осцилятор НПД з електричним збудженням коливань вигину виявляється раскліненних, що дозволяє поворотній пружині повернути ротор у вихідне положення. Навпаки, в двигуні з електричним збудженням поздовжніх коливань осцилятор в вимкненому стані заклинює ротор.

Спільне включення двох осциляторів з порушенням коливань різних типів (рис. 11, і) дозволяє майже вдвічі збільшити потужність високошвидкісних НПД

без збільшення габаритів (для порівняння на Мал. 11, к показаний НПД з осциляторами однакового типу).

2.2.П'єзоелектричні двигуни з пасивним ротором і збудженням коливань зсуву.

Нереверсивний п'єзоелектричний двигун з порушенням коливань зсуву відрізняється від двигуна з порушенням поздовжніх коливань тільки поляризацією п'єзoeлемента (рис. 12, а).

У п'єзoeлементі з поперечної по відношенню до напрямку прикладеного електричного поля поляризацією збуджуються одночасно коливання зсуву, як по товщині (рис. 12,б), так і по довжині (Рис. 12, в). На резонансних частотах ці коливання легко розділяються. Зазвичай резонанс коливань по довжині (коли $l > 2a$) мало помітний.

Резонанс зсуву по товщині п'єзoeлемента відрізняється низьким вхідним опором, рівним декільком Омів і навіть десятим часток Ома. Це пов'язано з тим, що зазначений резонанс спостерігається на порівняно високих частотах (сотні кілогерц). Ефективність електромеханічного перетворення визначається коефіцієнтом електромеханічного зв'язку зсувних коливань, який для деяких матеріалів досягає 0,7.

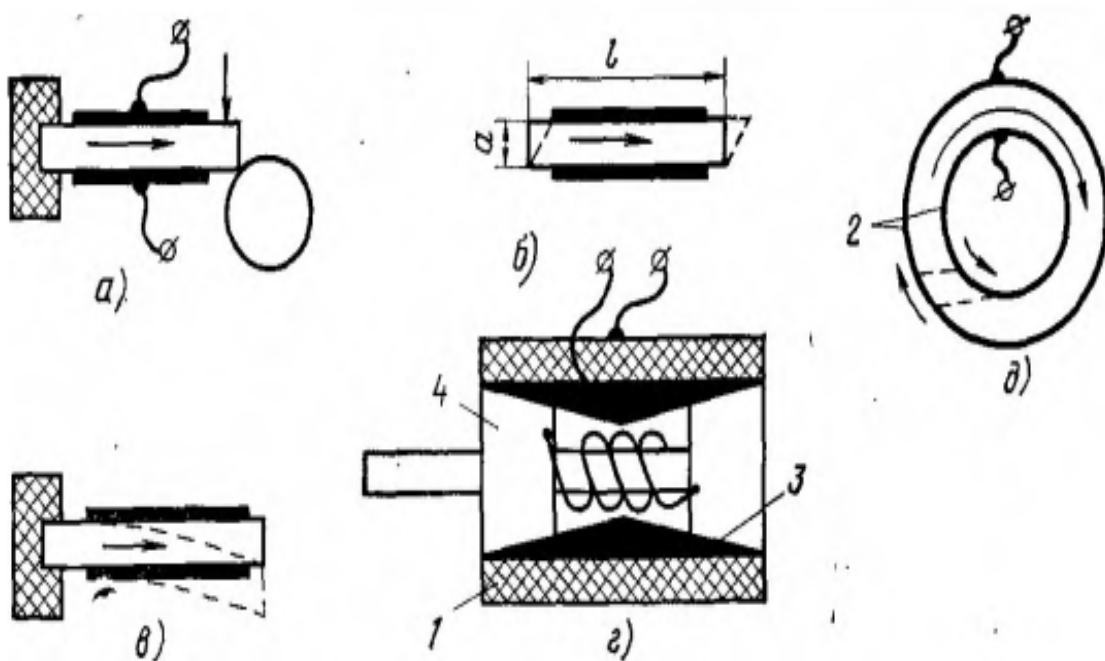
Створення НПД з порушенням коливань зсуву по товщині дозволяє значно підвищити робочу частоту двигуна — до 500 кГц. В результаті розширюється область частот безшумної роботи і значно знижується необхідна напругу живлення.

В даний час виготовлені макети, що підтверджують працездатність таких двигунів, однак їх параметри поки ще далекі від бажаних.

Дослідження НПД з порушенням коливань зсуву (Поперечних коливань) виявили складність процесів формування траєкторії руху контактної точки.

Виявилося, що коливання зсуву по товщині генерують як ізгібніе по товщині, так і поздовжні по довжині коливання. Підключення ротора і його навантаження (аж до затиснення) мало впливають на вхідний опір осцилятора. Цим пояснюється низький К.К.Д. двигуна з порушенням коливань зсуву (приблизно 10%). Справа в тому, що ротор незначно навантажує осцилятор і майже вся введена в резонатор енергія розсіюється на його внутрішньому опорі.

Дослідження коливань зсуву по товщині п'єзoeлектричній оболонки (рис. 12, г) дозволяє створити ПД з пасивним ротором, в якому контакт між ротором і статором відбувається не по лінії, а по поверхні. У цій конструкції п'єзоелемент 1 поляризований в тангенціальному напрямку. При підключенні електродів 2 до джерела змінної напруги зовнішня і внутрішня циліндричні поверхні п'єзоелемента зміщуються в протилежних напрямках (Рис. 12, д). Внутрішня поверхня через зносостійку прокладку 3 взаємодіє з ротором 4, збуджуючи в ньому радіальні коливання. Ці коливання забезпечують зачеплення ротора і статора в якомусь МБО одному напрямку.



Ри

с.12.ПД з пасивним ротором і збудженням коливань зсуву.

Збудження коливань зсуву по товщині циліндричної оболонки не покращує умови узгодження Осцилятора з навантаженням. Для підвищення к. П. Д. Доводиться збільшувати товщину оболонки, збільшуючи при цьому обсяг пьезоелемента. Тому розглянута конструкція є перспективною для ПД великої потужності (понад 100 Вт); вона не вимагає підшипників і виявляється компактніше інших конструкцій ПД.

2.3. П'єзоелектричні двигуни з пасивним ротором і збудженням обертових коливань. ПД з пасивним статорм.

Поєднання крутильних і поздовжніх коливань так ж може бути використано при створенні нових конструкцій ПД. На відміну від коливань зсуву по товщині циліндричної оболонки, крутильні коливання в оболонці можна розглядати як коливання зсуву по котра утворює циліндра. Коливання зсуву по товщині в елементарному обсязі можуть 'бути порушені напруженнями, прикладеними як по товщині, так і по довжині пьезоелемента. Відповідні варіанти порушення крутильних коливань показані на Мал. 13, а, б. Для реалізації цих варіантів п'єзоелемент виготовляють з декількох склеєних частин. Якщо з кожних двох сусідніх секцій одну поляризувати поздовжньо, а іншу по товщині, то крутильні коливання можна порушити і в суцільному циліндрі. В цьому випадку електроди наносять на поверхню циліндра у вигляді кілець або смуг (рис. 13, в, г).

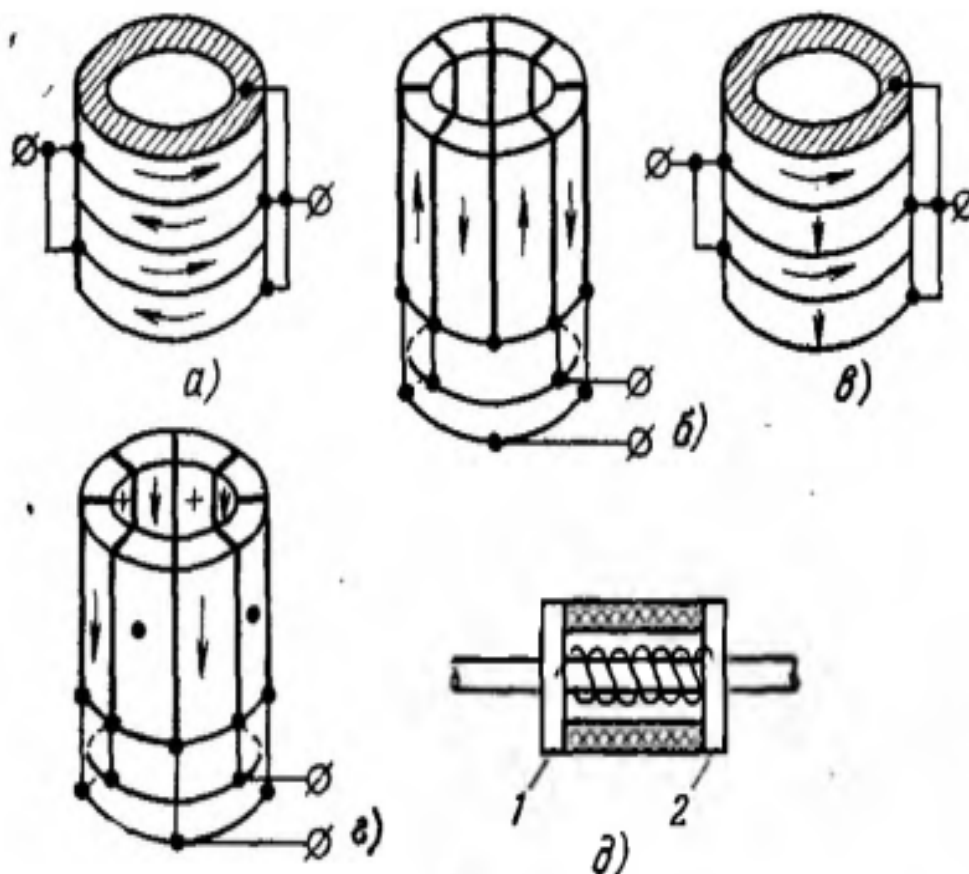


Рис.1

3. ПД з пасивним ротором і збудженням обертових коливань.

Один з варіантів ПД з електричним збудженням крутильних коливань показаний на рис. 13,б. В цій конструкції збудження поздовжніх коливань відбувається при куті контакту, що дорівнює нулю; тому для обертання ротора необхідний пусковий момент.

Якщо осцилятор ПД з електричним збудженням крутильних коливань розрахувати так, щоб робочими частотами були частоти перших мод крутильних і поздовжніх коливань, то частини ротора 1 і 2 (рис. 13,б) обертатимуться в протилежних напрямках. Для того щоб забезпечити обертання в одному напрямку, номери мод крутильних і поздовжніх коливань повинні відрізнитися на непарне число.

Найпростіший двигун з пасивним статором показаний на рис. 14, а, б. У цій конструкції осцилятор, виконаний у вигляді диска 1, закріплений на валу одним із способів, представлених на рис. 14, ст. Напруга через ковзаючі контакти 2 подається на осцилятор. На його поверхню спирається одна або кілька пружних пластинок 3.

Один з передбачуваних механізмів роботи такого двигуна полягає в наступному. Радіальні коливання, електрично збуджуються в диску, створюють в місці контакту диска з пластиною змінну

силу F нормальну до поверхні диска. Складові цієї сили $F_{\text{пр}}$ і $F_{\text{изг}}$ збуджують поздовжні і ізгібні коливання, які формують траєкторію точки контакту.

Як осцилятора можна використовувати і циліндричну оболонку (рис. 14, г, б). Для зменшення зносу на п'єзoeлемент одягають сталевий обруч або наносять шар зносостійкого матеріалу. Для збільшення потужності ПД осцилятор $У$ оточують пружними пластинами 3, які одночасно дозволяють встановлювати ротор в корпусі без підшипників (рис. 14,б).

Звернений варіант ПД з осцилятором у вигляді циліндричної оболонки дозволяє виключити ковзаючі контакти (рис. 14, г). Використання осцилятора з порушенням коливань зсуву по товщині циліндричної оболонки (рис. 14,б) дає можливість збільшити робочі частоти ПД з пасивним статором. Навпаки, зменшення частоти двигуна досягається при збудженні коливань зсуву по котра утворює циліндра, т. Е. Крутильних коливань (рис. 14, г).

П'єзoeлектричні двигуни з пасивним статором мають порівняно невисокі питомі характеристики; їх к.к.д. поки не перевищують 20%, причому двигуни є нерeverсивними і, як правило, низькооборотної. Слід, однак, відзначити, що їх акустичні шуми мають низький рівень, що істотно при використанні зазначених ПД для приводу диска електропрогравачі.

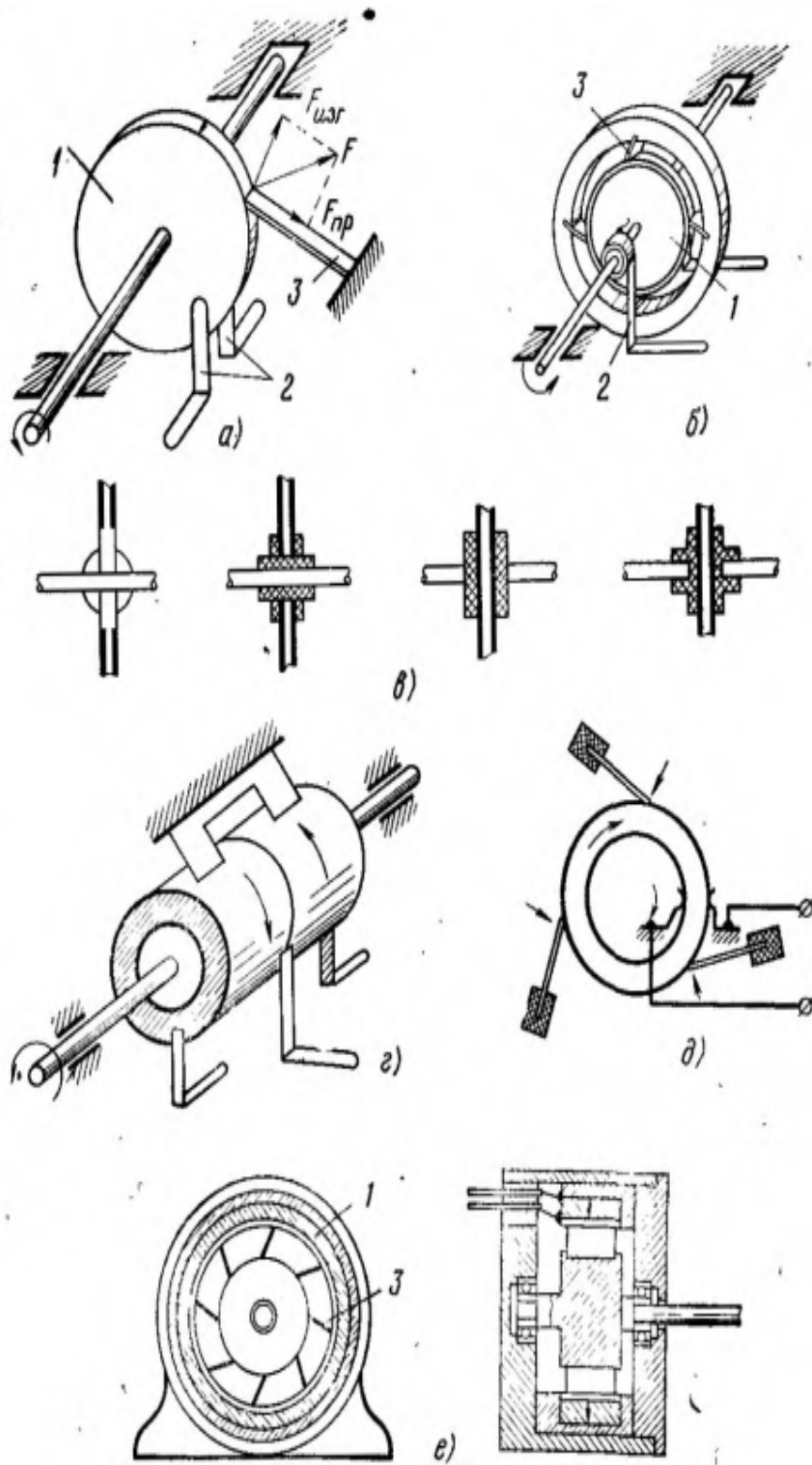


Рис.

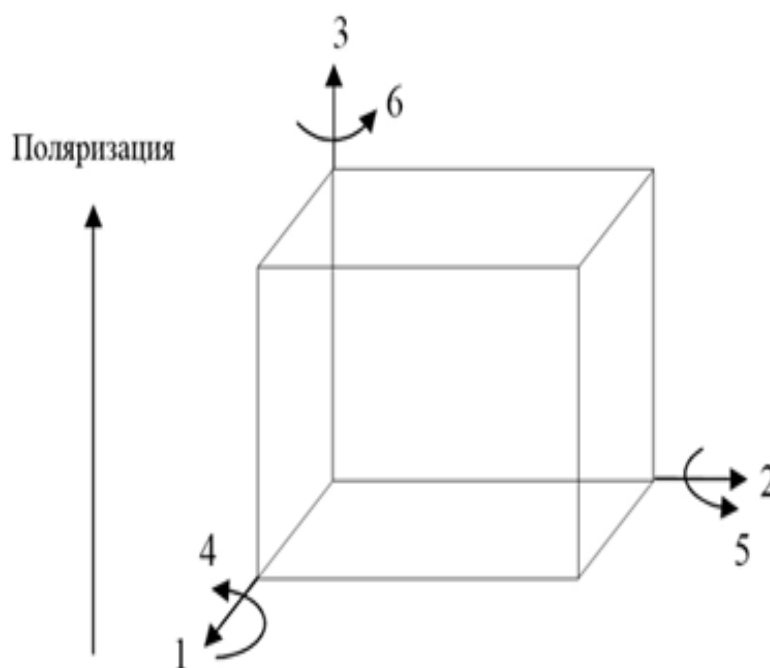
14. ПД з пасивним статором.

РОЗДІЛ 3. ВИБІР МАТЕРІАЛУ П'ЄЗОКЕРАМІКИ ДЛЯ ДВИГУНА

3.1. Властивості п'єзокераміки

Зв'язок між прикладеною силою і результируючою відповіддю п'єзoeлементa залежить від: п'єзoeлектричних властивостей п'єзокераміки, розміру і форм зразка, напрямлення електричного і механічного збудження.

За своєю природою п'єзoeлектричні матеріали є анізотропними кристалами. Рисунок 15 показує різні напрямки і осі орієнтації п'єзoeлектричного матеріалу. Осі 1, 2 і 3 є відповідними аналогами осей X, Y, Z класичної ортогональної системи координат, в той час як осі 4, 5, і 6 визначають осі обертання. Напрямок осі 3 є напрямком поляризації. Цей напрямок встановлюється під час виробництва за допомогою високої постійної напруги, яка створюється між електродами.



Ри

с.15. Напрямок та орієнтація осей п'єзoeлектричного матеріалу.

П'єзоеlement характеризується наступними властивостями:

- **Відотною діелектричної постійної;**

Відносна діелектрична постійна є відношенням діелектричної проникності матеріалу (в цьому випадку $\varepsilon^{T(S)}_{33}$ і $\varepsilon^{T(S)}_{11}$) до діелектричної проникності вакууму (ε_0).

Верхній індекс показує граничні умови які діють на матеріал в процесі визначення значення відносної діелектричної постійної. Зокрема індекс Т (в цьому випадку) говорить про те, що діелектрична постійна вимірюється на вільному (не затиснутому) зразку [3]. А індекс S показує, що вимірювання відбуваються при постійній деформації п'єзокераміки (в затиснутому стані). Перший нижній індекс показує напрямок діелектричного зсуву, а другий - електричного поля [1]. Формула розрахунку відносної діелектричної постійної наступна:

$$\frac{\varepsilon_{ij}^T}{\varepsilon_0} = \frac{tC}{\varepsilon_0^2 S} \quad , (3.1)$$

,де ε_{ij}^T - діелектрична проникність (одна з двох ε_{11}^T або ε_{33}^T), Ф / м

t - відстань між електродами, м,

S - площа електрода, м²,

C - ємність, Ф.

- **Резонансної частотою;**

Власна частота пластини по товщині f_0 обчислюється за такою формулою

$$f_0 = \frac{c}{2t} \quad , (3.2)$$

,де c - швидкість звуку в матеріалі, м / с [2].

- **Коефіцієнтами електромеханічного зв'язку;**

Коефіцієнти електромеханічного зв'язку k_p , k_{33} , k_{15} , k_t і k_{31} описують здатність п'єзoelementa перетворювати енергію з електричної в механічну і

навпаки. Квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку визначається як відношення накопиченої перетвореної енергії одного виду (механічної або електричної) до вхідної енергії другого виду (електричної або механічної). Індекс показує відносні напрямки електричних і механічних величин і вид коливань. Вони можуть бути пов'язані з модою коливань простого перетворювача певної форми. k_p означає взаємозв'язок електричної і механічної енергії в тонкому круглому диску, поляризованому по товщині що коливається в радіальному напрямку - планарна мода. k_{31} відноситься до довгого тонкого бруска з електродами на довгій поверхні. Вид коливань - розтяг по довжині. k_t пов'язаний з тонким диском або пластиною і визначає розтягування стиснення по товщині. k_{33} відповідає довгому тонкому бруска з електродами на його кінцях і поляризованому по довжині. Вид коливань - розтягування стиснення по довжині. k_{15} описує енергію перетворену в зсувні коливання по товщині.

Цей коефіцієнт може бути обчислений через резонансну і антирезонансну частоту за формулою.

$$k_t = \sqrt{\frac{f_a - f_r}{0,405(2f_a - f_r)}} \quad , (3.3)$$

де f_r - резонансна частота, Гц,

f_a - антирезонансна частота, Гц.

Щоб виміряти ці частоти зазвичай використовується аналізатор імпедансу, за допомогою якого можна отримати залежність опору від частоти п'єзокераміки (Рисунок 15).

За своєю природою, резонансна частота виникає, коли система має дуже маленький опір, в той час як антирезонанса відбувається, коли система має дуже великий опір. На рисунку 15 частота яка має мінімальний опір вважається резонансною (f_r), а частота з максимальним опором - антирезонансним (f_a).

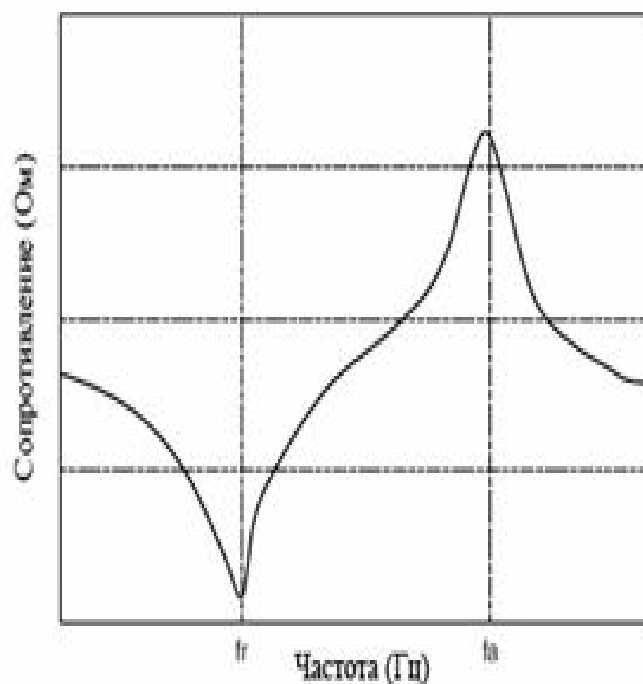


Рис.16. Залежність опору від частоти у п'єзокераміці

- **Пружні константи;**

Пружні властивості п'єзоелектричних матеріалів характеризуються пружними піддатливостями ($S_{ij}^{E,D}$) або пружними твердостями ($C_{ij}^{E,D}$). Пружна піддатливість визначає величину деформації виникаючої під впливом прикладеного механічного напруження. З огляду на те, що під впливом механічної напруги кераміка породжує електричну відповідь, яка протидіє результуючій деформації, ефективний модуль Юнга при якому замикання електродів менше ніж при холостому ході. На додаток, жорсткість різна в різних напрямках, тому для точного визначення величини вказуються електричні і механічні умови. Верхній індекс E говорить про те, що виміри відбуваються при постійному електричному полі (коротке замикання). У той час як, індекс D вказує на граничну умову - постійне електричне зміщення (індукція), тобто виміри відбуваються при холостому ході. Перша нижня цифра показує напрямок деформації, друга напрямок механічної напруги.

- **П'єзоелектричними постійними;**

П'єзоелектричний модуль d - відношення механічної деформації до прикладеного електричного поля (Кл / Н).

$$d_{33} = \frac{\Delta x_s}{U_s} \quad , (3.4)$$

,де Δx_s - зміна товщини пластини, м,

U_s - прикладена напруга, В

Корисно пам'ятати, що великі значення d_{ij} призводять до великих механічних зсувів, що зазвичай досягається при проектуванні ультразвукових перетворювачів. d_{33} застосовують, коли сила спрямована в напрямку осі поляризації. d_{31} використовують, коли сила прикладається під прямим кутом до осі поляризації, при цьому заряд виникає на електродах, так само як і в попередньому випадку. d_{15} показує, що заряд накопичується на електродах, які знаходяться під прямим кутом до початкових поляризуючим електродів і що одержувані механічні коливання є зсувними.

П'єзоелектрична константа тиску g_{ij} - відношення отриманого напруги до прикладеному тиску.

$$U_e = g_{33} dp_x \quad , \quad (3.5)$$

,де U_e — отримана напруга, В,

d - товщина, м,

p_x - прикладена тиск, Па.

Індекс "33" показує, що електричне поле і механічне напруження спрямовані по осі поляризації. Індекс "31" означає, що тиск прикладається під прямим кутом до осі поляризації, при цьому напруга знімається з тих же самих електродів, що і в разі "33". Індекс "15" прикладена напруга є зсувною і результуюче електричне поле перпендикулярно до осі поляризації. Високе значення g_{ij} веде до великих вихідним напруженням, що є бажаним для сенсорів.

- **Коефіцієнтом Пуассона;**

Коефіцієнт Пуассона - це відношення відносного поперечного стиснення до відповідного відносного поздовжнього подовження.

$$\mu = - \frac{\Delta a \cdot l}{\Delta l \cdot a}, \quad (3.6)$$

де μ - коефіцієнт Пуассона,

Δa - абсолютне збільшення товщини, м,

a - товщина після деформації, м,

Δl - абсолютне збільшення довжини, м,

l - довжина після деформації, м

• **Температурний коефіцієнт;**

Температурний коефіцієнт показує зміну різних властивостей матеріалу (резонансна частота, ємність, розміри) при зміні температури.

$$TKЧ = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{f(t_1) - f(t_2)}{f_{20}} \cdot 10^6, \quad (3.7)$$

де ТКЧ - температурний коефіцієнт резонансної частоти, ppm / °C,

$f(t_1)$ - резонансна частота при температурі t_1 , Гц,

$f(t_2)$ - резонансна частота при температурі t_2 , Гц,

f_{20} - резонансна частота при температурі 20°C, Гц,

Δt - різниця температур $\Delta t = t_2 - t_1$, °C.

$$TKЄ = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{C(t_1) - C(t_2)}{C_{20}} \cdot 10^6, \quad (3.8)$$

де ТКЄ - температурний коефіцієнт ємності, ppm / °C,

$C(t_1)$ - ємність при температурі t_1 , Ф,

$C(t_2)$ - ємність при температурі t_2 , Ф,

C_{20} - ємність при температурі 20°C, Ф.

$$TKЛР = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{l(t_1) - l(t_2)}{l_{20}} \cdot 10^6, \quad (3.9)$$

де ТКЛР - температурний коефіцієнт лінійного розширення, ppm / °C,

$l(t_1)$ - довжина при температурі t_1 , м,

$l(t_2)$ - довжина при температурі t_2 , м,

l_{20} - довжина при температурі 20°C, м

- **Швидкістю старіння;**

Швидкість старіння це показник зміни резонансної частоти і ємності з часом. Щоб обчислити цю швидкість, після поляризації електроди перетворювача з'єднуються разом, і зразок нагрівається певний період часу. Проводяться виміри резонансної частоти і ємності кожні 2^n (1,2,4 і 8) днів. Швидкість старіння обчислюється за такою формулою :

$$(AR) = \frac{1}{\log(t_2) - \log(t_1)} \cdot \frac{X_{(t_1)} - X_{(t_2)}}{X_{(t_1)}}, \quad (3.10)$$

де AR - швидкість старіння для резонансної частоти або ємності,

t_1, t_2 - число днів після поляризації,

X_{t_1}, X_{t_2} - резонансна частота або ємність через t_1 і t_2 днів після поляризації

- **Механічною добротністю;**

Добротність - кількісна характеристика резонансних властивостей коливальних систем, яка вказує у скільки разів амплітуда вимушених коливань при резонансі перевищує амплітуду вимушених коливань на частоті багато нижче резонансної при однаковій амплітуді збуджучої сили. Добротність дорівнює відношенню власної частоти ω резонансної системи до ширини $\Delta\omega$ частотної смуги, на кордонах якої енергія системи при вимушених коливаннях вдвічі менше енергії на резонансній частоті.

$$Q_m = \frac{f_a^2}{2\pi f_r Z_r C(f_a^2 - f_r^2)}, \quad (3.11)$$

де Q_m - механічна добротність,

f_r - резонансна частота, Гц,

f_a - антирезонансним частота, Гц,

Z_r - опір при резонансі, Ом,

C - ємність, Ф

Вироби, принцип дії яких ґрунтується на п'єзоелектричному резонансі, вимагають високої механічної добротності.

- **Температурою Кюрі;**

Температура Кюрі - це температура при перевищення якої п'єзоелектричний матеріал втрачає свої властивості.

- **Щільністю;**

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.1)$$

де ρ - щільність, кг / м³,

m - маса, кг,

V - об'єм, м³.

3.2. Зразки та характеристики п'єзокераміки різних виробників.

Параметр	Символ	Единица измерения									
			ЦТС-19	ЦТС-19М	ЦТС-БС-1	ЦТС-24М	ЦТС-БС-3	ЦТСНВ-1	ЦТССТ-3	ПКВ-460	ПКВ-820
Диэлектрическая проницаемость	$\epsilon_{33}^t/\epsilon_0$	1	1650	1850	4100	1050	2325	2325	1400	1450	1130
Тангенс угла диэлектрических потерь	$\tan \delta$	10^{-2}	0,0300	0,0250	0,0270	0,0075	0,0120	0,0220	0,0080	0,0033	<0,006
Коэффициент электромеханической связи	K_D	1	0,56	0,62	0,65	0,52	0,52	0,59	0,53	0,58	0,53
	K_{31}	1	0,29	0,35	0,38	0,30	0,30	0,34	0,31	0,33	0,31
	K_{33}	1	0,64	0,72	0,73	0,62	0,64	0,67	0,67	0,71	0,68
Пьезоэлектрический модуль	$(-)\ d_{31}$	10^{-12} Кл/Н	155	183	289	100	158	200	130	145	110
	d_{33}		360	410	600	255	360	425	290	315	265
	g_{31}	10^{-3} (В·м)/Н	8,9	10,9	8,0	11,9	7,7	8,2	9,1	11,7	11,0
	g_{33}		22,3	24,4	17,1	26,8	16,8	19,4	23,4	24,5	26,5
Частотная постоянная	N_D	Hz·м, м/с	2,0	2,0	2,0	2,2	2,4	2,0	2,2	2,24	2,27
Скорость звука	V_E^I	10^3 м/с	2,95	2,85	2,75	3,55	3,47	2,92	3,24	3,20	3,18
Упругая жесткость	S_{11}^E	10^{-12} м ² /Н	15,8	16,3	16,0	11,5	11,1	15,3	12,6	12,7	12,3
	S_{33}^E		16,8	17,5	18,5	15,4	13,9	16,5	15,5	15,3	16,6
Коэффициент Пуансона	ν	1	0,38	0,36	0,38	0,31	0,30	0,34	0,31	0,32	0,32
Предел механической прочности при статическом растяжении/сжатии, не менее:	$\sigma_{\text{раст}}$	10^6 Н/м ²	не нормир.	не нормир.	19,6		21,6		19,6		
	$\sigma_{\text{сжат}}$		294	294	400		392		400		
Механическая добротность	Q_m	1	90	90	50	200	200	57	800	1200	2200
Точка Кюри	T_C	$^{\circ}\text{C}$	290	300	170	280	180	240	280	295	350

РОЗДІЛ 4. ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

Для проектування п'єзодвигуна виберемо найпростішу в реалізації конструкцію, яка показана на рисунку 17.

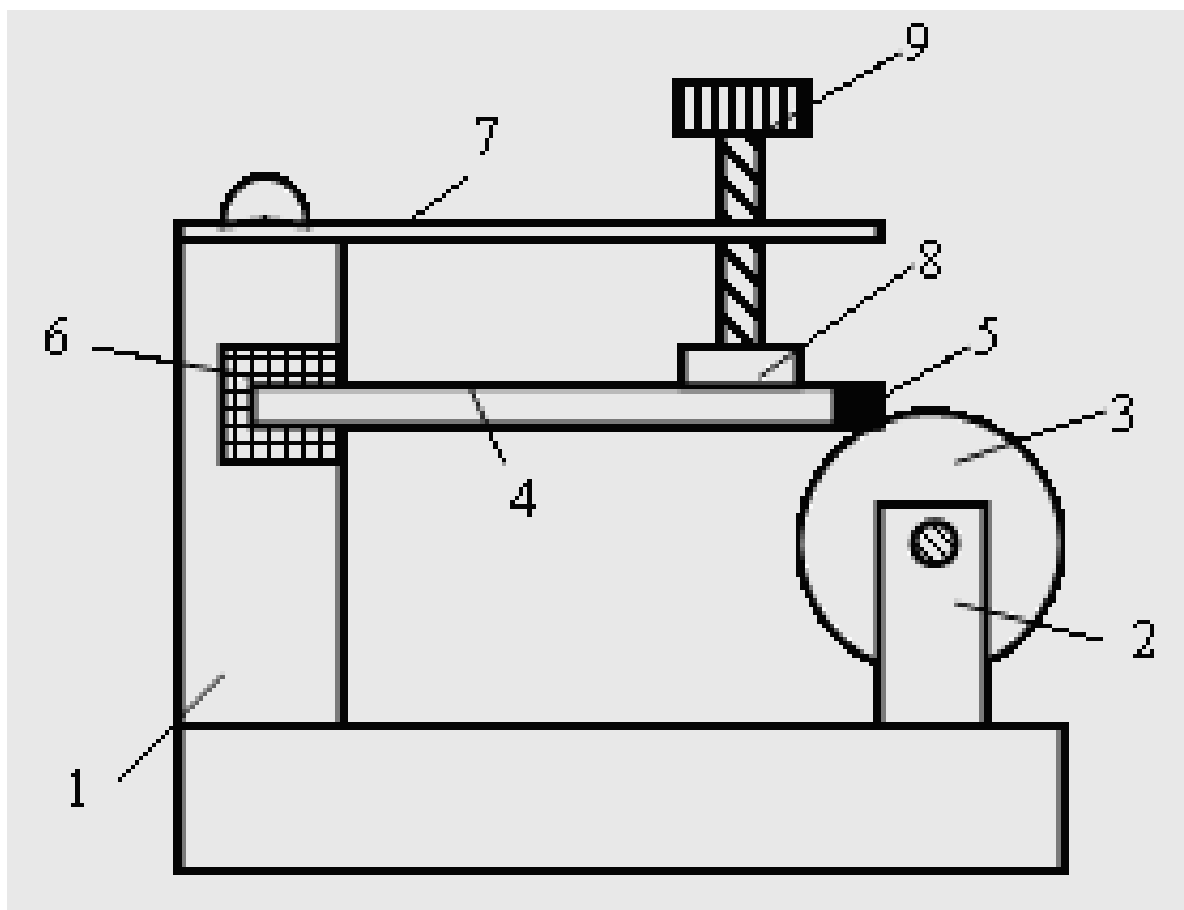


Рис.17. Найпростіша конструкція ПД.

Основними елементами конструкції розглядуваного двигуна є статор і ротор (рис.17). На основі 1 встановлений підшипник 2. Ротор 3, виконаний з твердого матеріалу (сталь, чавун, кераміка та ін.) Являє собою гладкий циліндр.

Невід'ємною частиною ПД є акустично ізольована від основи і осі ротора електромеханічна коливальна система - осцилятор (вібратор). У найпростішому випадку він складається з п'єзопласти 4 разом з зносостійкою прокладкою 5. Другий кінець пласти 4 закріплений в основі за допомогою еластичної прокладки 6 з фторопласта, гуми або іншого подібного матеріалу. Осцилятор притискається

до ротора сталеною пружиною 7 , кінець якої через еластичну прокладку 8 тисне на вібратор. Для регулювання ступеня притиснення служить гвинт 9.

РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ЙОГО РОБОТУ

5.1. Дослідження п'єзoeлемента номер 1.

Параметри ПЄ:

$$C_{\text{ПЄ}} = 1,693 \text{ нФ}$$

$$\text{tg}\delta = 0.0028$$

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{ПЄ}} d}{\varepsilon S} = \frac{1673 \cdot 10^{-12} \cdot 9,4 \cdot 10^{-3}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1026 \cdot 10^{-6}} = 1741$$

$$i_r = 3,8 \text{ мА};$$

$$R_r = 45,3 \text{ Ом};$$

$$f_r = 32,371 \text{ кГц};$$

$$f_a(10 \text{ Ом}) = 33,297 \text{ кГц};$$

$$i_a(10 \text{ Ом}) = 0,0035 \text{ мА};$$

$$f_a(100 \text{ Ом}) = 33,504 \text{ кГц};$$

$$i_a(100 \text{ Ом}) = 0,0022 \text{ мА};$$

Розрахуємо добротність ПЄ:

$$Q_m = \frac{f_r}{2 \cdot (f_a - f_r)} \cdot \sqrt{\frac{i_r}{i_a}} \cdot \left(1 - \frac{i_a}{i_r}\right) = \frac{32,371}{2 \cdot (33,297 - 32,371)} \cdot \sqrt{\frac{3,8 \cdot 10^{-3}}{3,5}} \cdot \left[1 - \frac{3,5}{3,8 \cdot 10^{-3}}\right] = 17,48 \cdot 0,033 \cdot 920 = 530$$

П'єзомодуль:

$$d_{31} = \frac{\pi}{4lf_r} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{33}}{\rho_v}} \cdot \frac{(f_a - f_r)}{f_r} = 114,65 \cdot 10^{-12} [\text{Кл/Н}]$$

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку:

$$k_{31} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4 \cdot f_r}{\pi^2 \cdot (f_a - f_r)}}} = 3,55$$

Дослідження впливу вхідного сигналу на механічну добротність:

Дослідження реалізуємо за допомогою схеми зображеної на рис.18.

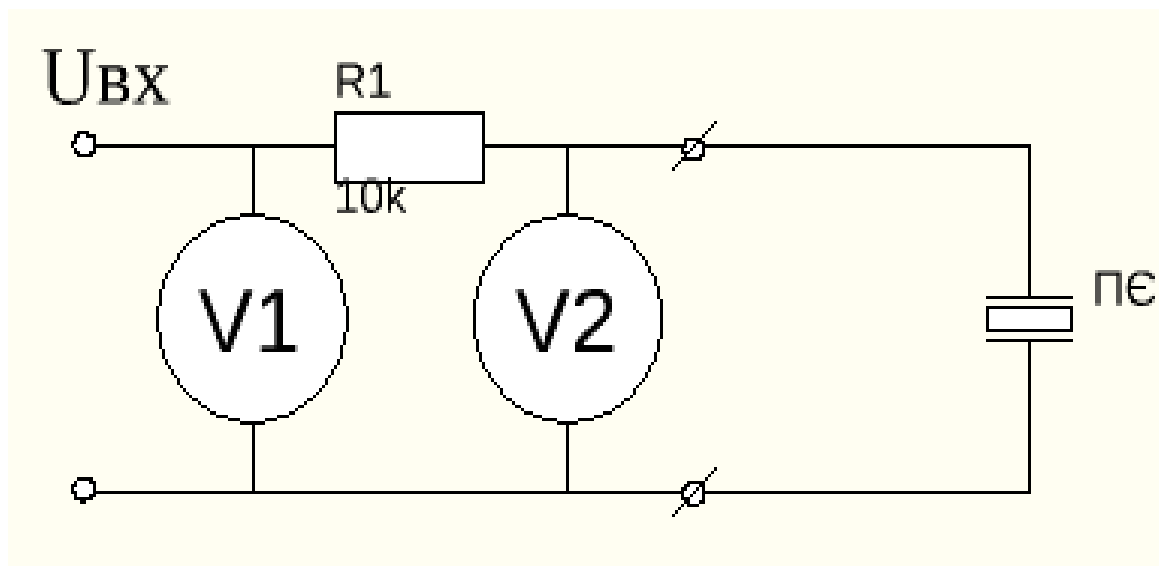


Рис.18. Схема для дослідження ПЕ.

де R_1 резистор який контролює величину вхідного сигналу, V_1 вольтметр для виміру значення вхідного сигналу, V_2 вольтметр для виміру напруги на п'єзоелементі.

За допомогою цієї схеми я отримав наступну залежність.

Таблиця 1: Залежність напруги на ПЕ від величини вхідного сигналу.

$I_1, \text{мА}$	0,1	0,5	1,0	5,0	10,0	15,0	50,0	100,0
$U_{\text{пЕ}}, \text{мВ}$	6,8	32	66	360	650	950	3000	8500

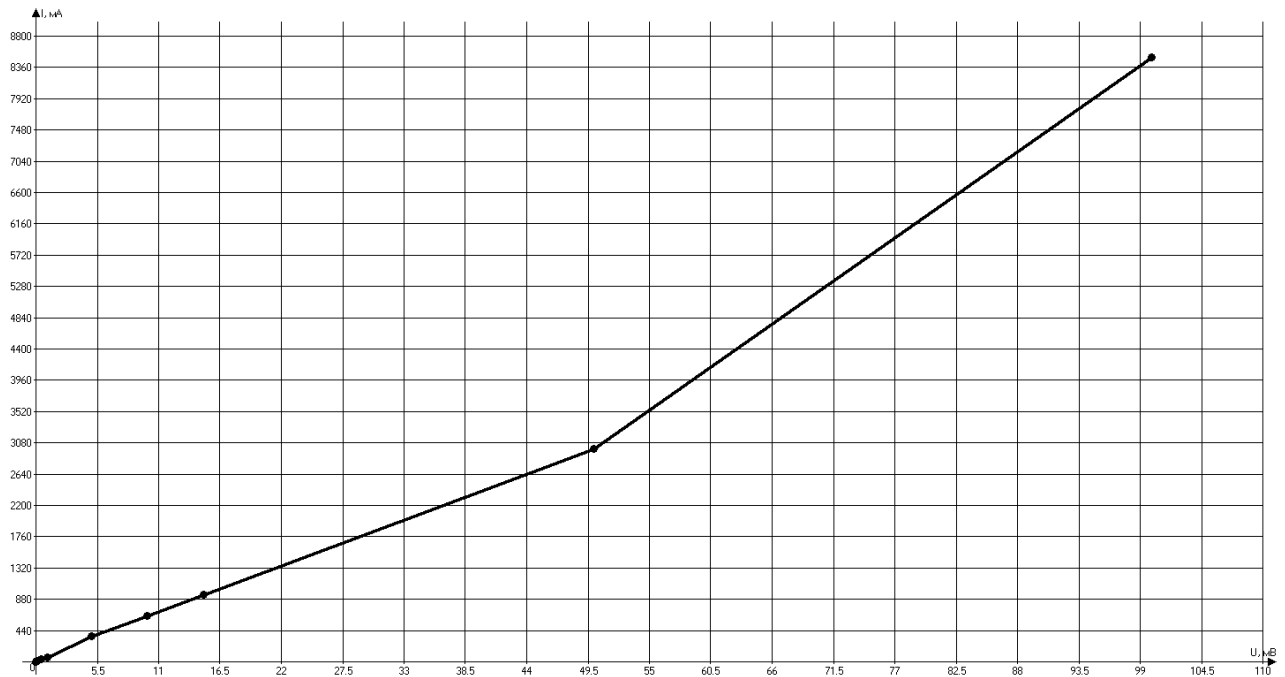


Рис.19.Залежність напруги на ПЕ від величини вхідного сигналу.

Розрахуємо значення динамічного опору на кожному проміжку:

$$R_{\partial} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

$R_{0,1-0,5}$	$R_{0,5-1}$	R_{1-5}	R_{5-10}	R_{10-15}	R_{15-50}	R_{50-100}
63	68	73,5	58	60	58,8	110

Проаналізувавши дані ми бачимо що на пчатку наша залежність ліній, але після збільшення величини вхудного сигналу до 50 мА лінійність зникає, добротність зменшується і з нею і ККД п'єзоелемента, використовувати елемент стає не раціонально і не рентабельно.

5.1. Дослідження п'єзoeлементa номер 2.

$$C_{\text{ПЄ}}=611,6 \text{ пФ}$$

$$\text{tg}\delta=0.0071$$

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{ПЄ}} d}{\varepsilon S} = \frac{611,6 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 245 \cdot 10^{-6}} = 816,21$$

$$i_r=97 \text{ мА};$$

$$f_r=47,41 \text{ кГц};$$

$$f_a(10 \text{ Ом})=48,55 \text{ кГц};$$

$$i_a(10 \text{ Ом})=1 \text{ мА};$$

$$f_a(100 \text{ Ом})=49,21 \text{ кГц};$$

$$i_a(100 \text{ Ом})=4,5 \text{ мА};$$

Дослідимо залежність струму від частоти при різній силі прижиму ПЄ до валу:

Таблица 2: Залежність струму від частоти при $U_{\text{вх}}=50\text{В}$, сила прижиму 350г.

f , кГц	47	47,5	48	48,5	49
I , мА	40	61	44	27	25
f_p , кГц	47,4		I_p , мА	74	

Таблица 3: Залежність струму від частоти при $U_{\text{вх}}=50\text{В}$, сила прижиму 600г.

f , кГц	47	47,5	48	48,5	49
I , мА	36	54	50	28	25
f_p , кГц	47,7		I_p , мА	64	

Таблиця 4: Залежність струму від частоти при $U_{вх}=50В$, сила прижиму 850г.

f , кГц	47	47,5	48	48,5	49
I , мА	37	64	38	27	25
f_p , кГц	47,6		I_p , мА	66	

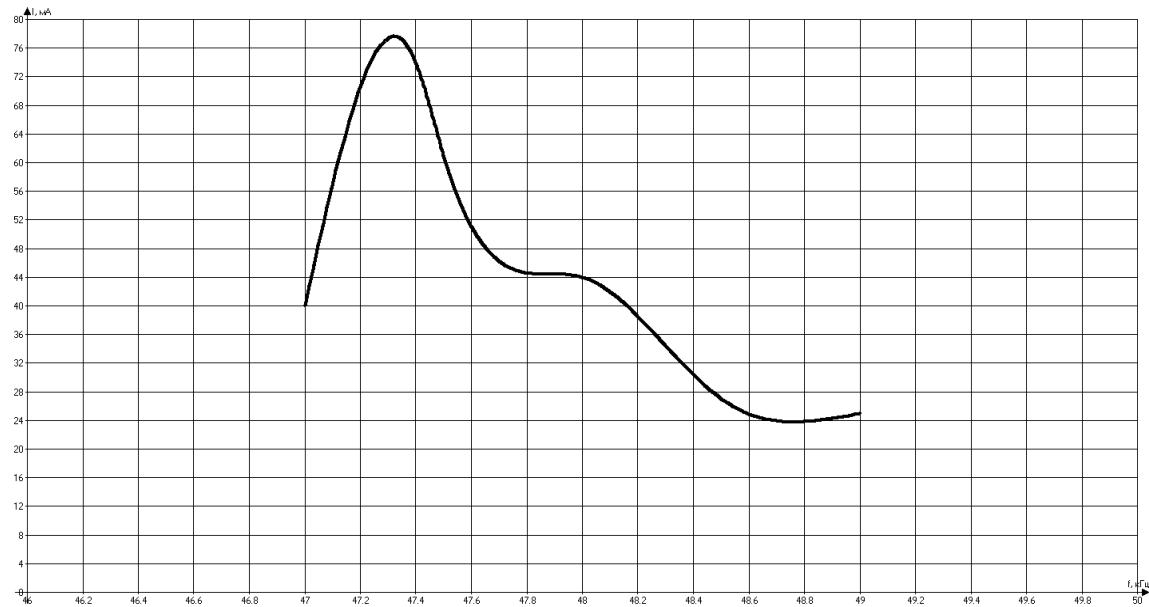
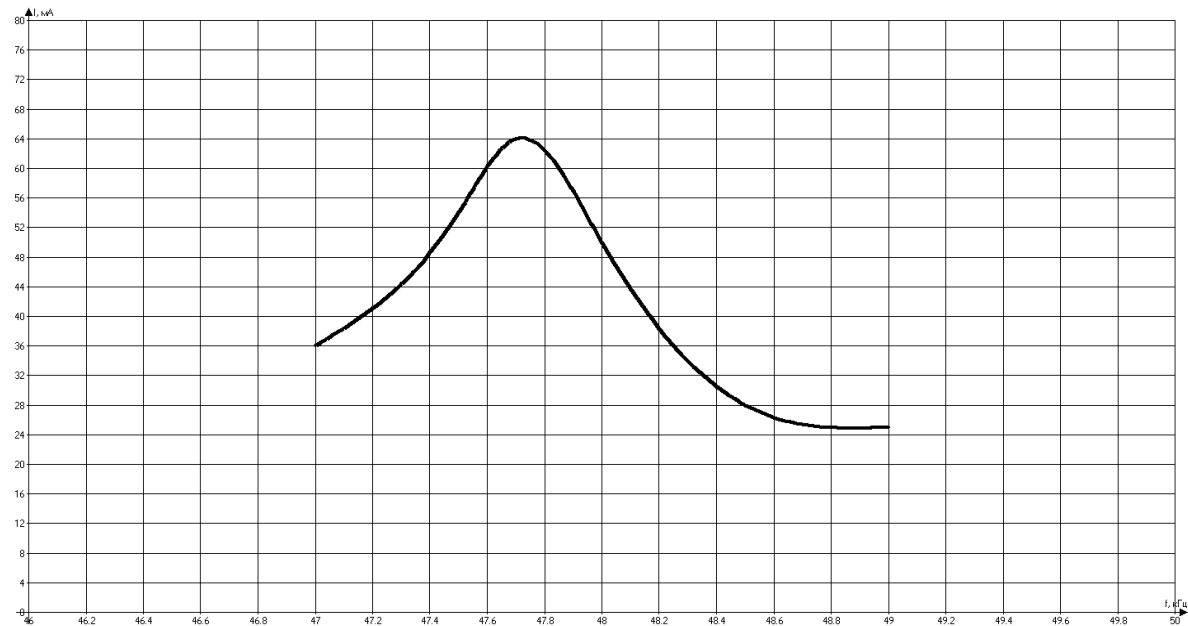


Рис.20.

Залежність струму від частоти при $U_{вх}=50В$, сила прижиму 350г.



Рис

.21. Залежність струму від частоти при $U_{вх}=50В$, сила прижиму 600г.

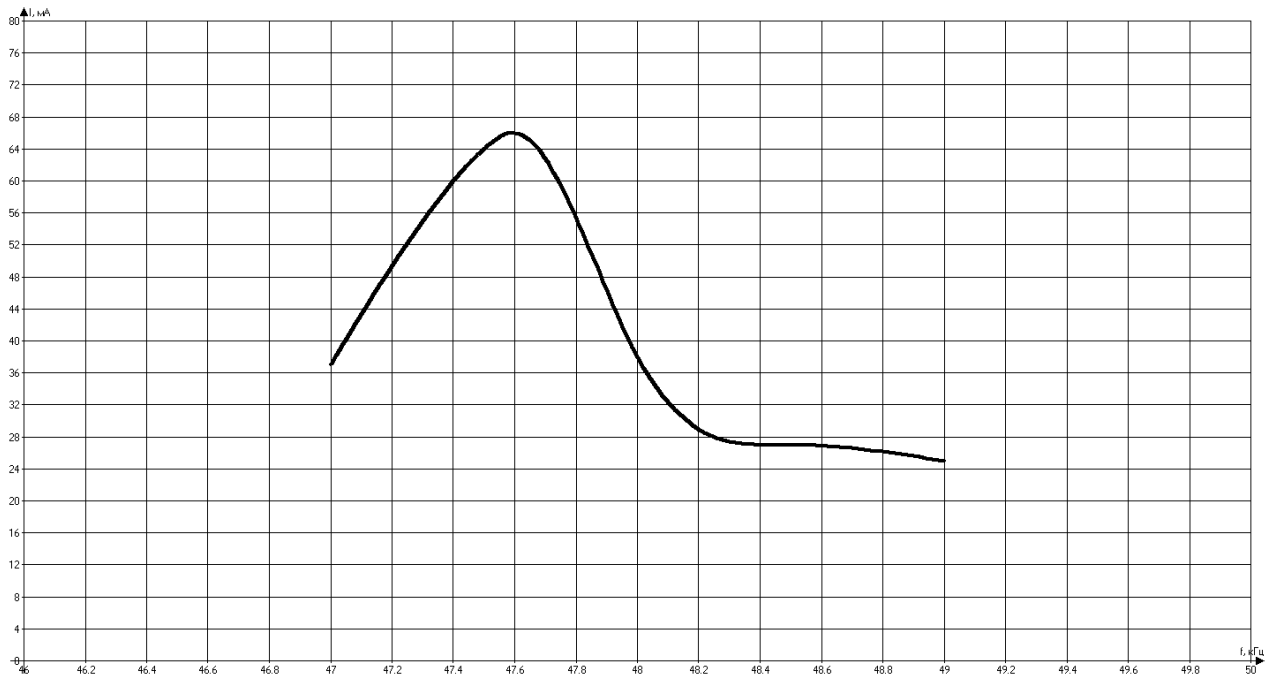


Рис.22. Залежність струму від частоти при $U_{вх}=50V$, сила прижиму 850г.

Проаналізувавши отримані данні бачимо що в залежності від сили прижиму п'єзоелемента до вала резонанс зміщується, що потрібно враховувати при подальших розробках п'єзоелектричних двигунів.

Таблиця 5: Залежність напруги на ПЄ від величини вхідного сигналу.

I_1, mA	1,0	2,0	4,0	8,0	10,0	15,0	20,0
$U_{\text{ПЄ}}, \text{V}$	0,125	0,255	0,4	0,8	0,94	1,4	2,1

I_1, mA	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	50,0
$U_{\text{ПЄ}}, \text{V}$	2,5	3,5	5	6,1	7,1	7,8	8,8	9,8

Розрахуємо значення динамічного опору на кожному проміжку:

R_{1-2}	R_{2-4}	R_{4-8}	R_{8-10}	R_{10-15}	R_{15-20}	R_{20-25}
0,13	0,0725	0,1	0.07	0,092	0,14	0,08

R ₂₅₋₃₀	R ₃₀₋₃₅	R ₃₅₋₄₀	R ₄₀₋₄₅	R ₄₅₋₅₀	R ₅₀₋₅₅	R ₅₅₋₆₀
0,2	0,3	0,22	0,2	0,14	0,2	0,2

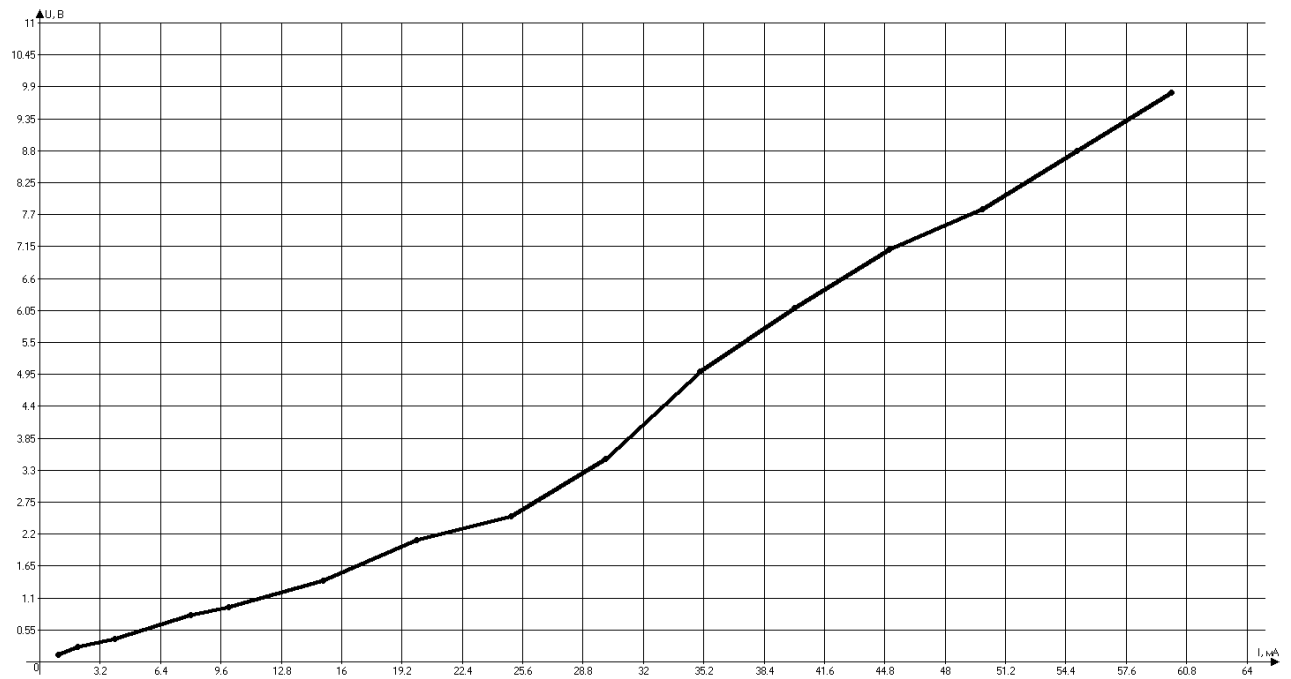


Рис.23. Залежність напруги на ПЄ від величини вхідного сигналу.

Проаналізувавши даний графік ми бачимо що добротність ПЄ різко зменшується при вхідному струмі 25 мА, а лінійність добротності змінюється.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

6.1. Загальні висновки з роботи.

У дипломній роботі я дослідив експлуатаційні параметри ПЄ для використання його в побудові ПД.

Я визначив що головними параметрами ПЄ для наших цілей є добротність і його коефіцієнт електромеханічного зв'язку та п'єзоелектричними постійними. НЕ останню рроль грає величина вхідного сигналу яка залежить від того яку потужність на собі може розсіяти на собі ПЄ, це важливо для розробки установки підключення нашого ПД, щоб його характеристики були оптимальними і час його роботи був максимальним. Не останню роль в цьому грає кут під яким ПЄ доторкається до валу, він має повністю своєю площиною прилягати на валу однаково по всій алощі контакту. Для меншого зношення ПЄ на його кінець який критить вал можна приклеїти захисні матеріали(гума, металева пластина тощо), що збільшить час його експлуатації і цілісність самого елемента.

Прижим грає не менж важливу роль, вінтеж впливає на час роботи двигуна, але також він впливає на швидкість обертання та момент. Чим менша сила прижиму тим більша швидкість і менший момент, зі зростанням сили прижиму швидкість зменшується а момент починає рости це є важливим фактором при викаристанні ПД в приладобудуванні це повністю змінює галузь його використовування.

Процес перетворення коливань п'єзокерамического кільця в поступальний (обертальний) рух ротора (механічне детектування) здійснюється наступним чином:

- при включенні генератора механічні коливання пьезокерамического кільця через штовхачі передаються на ротор;
- в області фрикційного контакту штовхачів з ротором вектори сил, переданих штовхачами, розкладаються на складові - складову вздовж радіуса ротора і складову, спрямовану по дотичній до окружності ротора;
- остання складова призводить ротор в обертальний рух, швидкість обертання ротора при цьому пропорційна амплітуді механічних коливань кільця.

В залежності від ступеня мініатюризації використовуються різні типи мікромоторов. Для макрорівня, де потрібна велика потужність при відносно малих розмірах, застосовуються мініатюрні електромагнітні двигуни і соленоїди. Для мікропристроїв в даний час широко використовуються інтегральні приводи, створені за MEMS технології. П'єзоприводи програють електромагнітним двигунів по потужності, а MEMS мікромоторам - за ступенем мікромініатюризації. Однак основна перевага мікро ПД - можливість прямого позиціонування з субмікронною точністю. Крім того, ці приводи мають безліч інших переваг перед своїми електромагнітними конкурентами.

Електромагнітні мікроелектродвигуни (колекторні, крокові та безколекторні) в даний час досягли межі мініатюризації. Наприклад, серійно випускаємий кроковий електродвигатель типу A0820 має діаметр 8 мм, вага 3,3 грама і коштує близько \$ 10. Двигуни цього типу досить складні і містять сотні деталей. При подальшому зменшенні розмірів ускладнюється процес складання, а також зменшується ефективність двигуна. Для намотування котушок статора доводиться використовувати більш тонкий провід, який має більш високий опір. Так, при зменшенні розмірів колекторного мікроелектродвигателя до 6 мм значно більша частина підводиться електричної енергії перетворюється в тепло, ніж в механічну енергію. У більшості випадків для отримання лінійних приводів на базі електродвигунів необхідно застосування додаткових механічних передач і редукторів, які перетворюють обертальний рух в поступальний і забезпечують потрібну точність позиціонування. При цьому зростають розміри всього пристрою в цілому, а значительна частина енергії витрачається на подолання тертя в механічній передачі. В даний час багатьма фірмами освоєно серійне виробництво п'єзомоторов. У статті розглядається продукція двох виробників п'єзоприводи: німецького Physik Instrumente (PI) і американського New Scale Technologies. Вибір фірм не випадковий. Американська фірма Надал момент виробляє найменші в світі п'єзодвигатели, а німецька є одним з лідерів в секторі п'єзоприводи для прецизійного обладнання. Продукція, що нею п'єзомотори мають унікальні функціональні характеристики і користуються заслуженою репутацією серед виробників прецизійного технологічного та вимірювального обладнання. Обидві фірми використовують свої патентовані рішення. Принцип роботи двигателів обох фірм, а також їх конструкція різні.

Перелік використаної літератури

1. Пьезоэлектрические двигатели. В. В. Лавриненко, И. А. Карташев, В. С. Вишневский. 1980 г.
2. Интернет ресурс:
<http://engineering-solutions.ru/ultrasound/piezomaterials/#6> .
3. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. Петренко С.Ф. 2002 г.
4. Вибродвигатели. Р. Ю. Бансявичюс, К. М. Рагульскис. 1981 г.
5. Принципы построения пьезоэлектрических моторов. В. Лавриненко. 2015г.
6. Система управления ультразвуковыми пьезоэлектрическими двигателями. Бардин В.А., Васильев В.А.
7. Интернет ресурс:
https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C .